



Tiago Filipe Monteiro da Costa

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Percolação na fundação de barragens de betão: influência das cortinas de impermeabilização e de drenagem

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Geotecnia

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana,
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues
Arguente: Prof. Doutor Armando Manuel Nunes Sequeira Antão
Vogal: Prof. Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Percolação na fundação de barragens de betão: influência das cortinas de impermeabilização e de drenagem

Copyright © Tiago Filipe Monteiro da Costa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana, por toda a paciência, apoio, boa disposição, disponibilidade e dedicação que demonstrou. Foi um prazer aprender e trabalhar com ela durante a dissertação e durante o percurso académico.

Um agradecimento especial a todos os professores do departamento de engenharia civil da FCT-UNL, com quem tive a oportunidade de me desenvolver, tanto a nível pessoal como profissional e por todos os conhecimentos que me transmitiram.

Aos meus colegas e amigos pelo companheirismo, pela ajuda, pela amizade que criámos, por tudo o que partilhámos.

À minha irmã Marta, por tudo o que ela representa na minha vida, pela paciência, apoio, amizade e amor.

Agradeço à minha namorada Joana, por todos os momentos que partilhámos, pelo apoio incondicional, pela paciência, pelo amor e por estar sempre presente.

Gostaria de deixar um agradecimento especial aos meus pais por todas as oportunidades que me possibilitaram, muitas vezes com restrições pessoais, pela educação, pelo amor, pelo carinho e pela confiança que sempre depositaram em mim.

Resumo

A caracterização das pressões da água na base de uma barragem é um requisito fundamental para garantir a sua segurança. A utilização de dispositivos de dissipação de energia, tais como cortinas de impermeabilização e cortinas de drenagem, visam contribuir para a diminuição dos efeitos da pressão da água. Esta dissertação pretende contribuir para a compreensão da importância das cortinas de impermeabilização e de drenagem no controlo da carga hidráulica, do caudal e do gradiente de saída. É feita uma breve análise à forma de funcionamento destes dispositivos e descreve-se as soluções analíticas de Ijam (2011), para resolver um modelo com cortina de impermeabilização, e de Andrade (1982), para resolver um modelo com cortina de drenagem. As soluções analíticas obtidas com estes modelos são comparadas com os resultados obtidos num programa de cálculo automático, servindo estes modelos base as análises realizadas nos restantes capítulos. Procede-se a uma análise paramétrica para estudar os efeitos do comprimento, inclinação, posição e permeabilidade da cortina de impermeabilização e de um sistema constituído por cortinas de impermeabilização e de drenagem. Quando aplicável, efetuam-se comparações com outros autores. Analisam-se os resultados obtidos de modo a avaliar por um lado, os efeitos da introdução de uma cortina de impermeabilização para as diferentes situações e, por outro, o efeito acrescentado da introdução de cortina de drenagem quando existe uma cortina de impermeabilização. Tiram-se ainda algumas conclusões sobre as melhores relações a adotar para cada caso.

Palavras-chave: carga hidráulica, caudal, gradiente de saída, cortina de impermeabilização, cortina de drenagem, soluções analíticas

Abstract

The characterization of water pressures at the base of a dam is an essential requirement to ensure the security of the dam. The use of energy dissipation devices, such as cutoff walls and drainage curtains, aim to contribute to the reduction of the effects of water pressure. This thesis aims to contribute to the understanding the importance of the cutoff walls and drainage curtains in checking the hydraulic head, flow and the exit gradient. It begins by making a brief analysis of the way these devices work. Ijam (2011) analytical solution is described, to solve a model with a cutoff wall, and Andrade (1982) analytical solution is used to solve a model with drainage curtain and compares the results with those obtained in automatic calculation program, serving of base templates for remaining chapters. Parametric analysis is performed to studying the effects of length, position, inclination and permeability off cutoff walls and draindage curtians. When applicable, comparisons are made with other authors. Results are analyzed to determinate the effect of introducing a cutoff for the different situations and the added effect of introducing a drainage curtain when there is already a cutoff wall. Some conclusions are drawn about the best solution to adopt for each case.

Keywords: cut off wall; drainage curtain, uplift pressure, water flow, hydraulic structures, analytical solutions

Conteúdo

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objetivo da dissertação	2
1.3 Organização da dissertação	2
2 Fundamentos teóricos	5
2.1 Introdução	5
2.2 Ações a considerar nas barragens	5
2.3 Dispositivos para controlo das subpressões	7
2.3.1 Efeito da cortina de impermeabilização	7
2.3.2 Efeito da cortina de drenagem	8
2.4 Soluções analíticas	9
2.4.1 Determinação da carga hidráulica com cortina de impermeabilização - Solução de Ijam	9
2.4.2 Determinação de caudais com cortina de drenagem - Solução de Andrade	11
2.5 Instabilidade hidráulica	14
3 Modelos Base	15
3.1 Introdução	15
3.2 Definição dos modelos base	16
3.2.1 Introdução	16
3.2.2 Propriedades geométricas dos modelos base	17
3.2.3 Propriedades do maciço de fundação	18
3.2.4 Propriedades das cortinas de impermeabilização e de drenagem	18
3.3 Modelação no SEEP/W [®]	21
3.3.1 Implementação dos modelos base	21

3.3.2	Obtenção de resultados	23
3.4	Influência da discretização da malha de elementos finitos	26
3.5	Comparação com soluções analíticas	30
3.5.1	Solução de Ijam - Modelo com cortina de impermeabilização	30
3.5.2	Solução de Andrade - Modelo com cortina de drenagem	32
4	Análise Paramétrica: Modelo com cortina de impermeabilização	35
4.1	Introdução	35
4.2	Estudo da influência do comprimento da cortina	37
4.3	Estudo da influência da inclinação da cortina	42
4.4	Estudo da influência da localização da cortina	46
4.5	Estudo da influência da permeabilidade	50
4.6	Comparação com outros autores	54
4.6.1	Introdução	54
4.6.2	Análise do comprimento	54
4.6.3	Análise da inclinação	57
4.6.4	Análise da localização	59
5	Análise paramétrica: Modelo com cortina de drenagem	63
5.1	Introdução	63
5.2	Estudo da influência do comprimento da cortina	65
5.3	Estudo da influência da inclinação das cortina	70
5.4	Estudo da influência da localização da cortina	74
5.5	Comparação com outro autor	78
6	Análise de resultados	81
6.1	Introdução	81
6.2	Efeito das cortinas de impermeabilização e de drenagem	85
7	Considerações Finais	91
7.1	Conclusões	91
7.2	Desenvolvimentos Futuros	94
	Bibliografia	95
A	Anexo	97

Lista de Figuras

2.1	Perfil transversal típico de uma barragem (Adaptado de Fell et al. (2005)) .	6
2.2	Diagramas de pressões que atuam numa barragem	7
2.3	Subpressões com cortina de impermeabilização	8
2.4	Subpressões com cortina de impermeabilização e drenagem	9
2.5	Transformação de plano de Schwarz-Christoffel (Adaptado de Ijam (2011)) .	10
2.6	Modelo utilizado (Adptado de Andrade (1982))	12
3.1	Representação esquemática dos modelos utilizados	16
3.2	Modelos base modelados no SEEP/W [®]	21
3.3	Materiais definidos e suas características	22
3.4	Condições de fronteira definidas	22
3.5	Obtenção do desenvolvimento da carga hidráulica no SEEP/W [®]	23
3.6	Exemplo da obtenção da resultante da carga hidráulica	24
3.7	Obtenção do caudal no SEEP/W [®]	25
3.8	Obtenção do gradiente de saída no SEEP/W [®]	26
3.9	Variação da carga hidráulica para as diferentes discretizações consideradas .	27
3.10	Desenvolvimento do gradiente de saída, ao longo de jusante, para as diferentes discretizações consideradas	28
3.11	Variação da carga hidráulica para diferentes discretizações consideradas do modelo com cortina de drenagem	28
3.12	Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante, para as diferentes discretizações consideradas	29
3.13	Comparação da carga hidráulica com solução analítica de Ijam (2011) . . .	32
4.1	Definição do modelo utilizado	36
4.2	Caudal e linhas equipotenciais obtidos com a variação do comprimento da cortina	38
4.3	Variação da carga hidráulica com o aumento do comprimento da cortina . .	39
4.4	Porcentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com o aumento do comprimento da cortina	40
4.5	Desenvolvimento do gradiente saída ao longo de jusante	41
4.6	Valores do gradientes de saída máximo com o aumento do comprimento da cortina	41

4.7	Caudal e linhas equipotenciais com a variação da inclinação da cortina . . .	42
4.8	Variação da carga hidráulica com a inclinação da cortina de impermeabilização	43
4.9	Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a inclinação da cortina	44
4.10	Desenvolvimento do gradiente saída ao longo de jusante	45
4.11	Valores do gradiente de saída máximo com a inclinação da cortina	45
4.12	Caudal e linhas equipotenciais com a variação da localização da cortina . .	46
4.13	Variação da carga hidráulica com a localização cortina	47
4.14	Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a localização da cortina	48
4.15	Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante	49
4.16	Valores do gradiente de saída máximo com a localização da cortina	49
4.17	Caudal e linhas equipotenciais com a variação da permeabilidade da cortina de impermeabilização	50
4.18	Variação da carga hidráulica com a variação do coeficiente de permeabilidade da cortina	51
4.19	Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a variação do coeficiente de permeabilidade da cortina	52
4.20	Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante	53
4.21	Valores do gradiente de saída máximo com a variação do coeficiente de permeabilidade da cortina	53
4.22	Comparação da variação da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina	55
4.23	Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização	56
4.24	Comparação do gradiente de saída com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização	56
4.25	Comparação da variação da carga hidráulica com a variação da inclinação da cortina	58
4.26	Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização	58
4.27	Comparação do gradiente de saída com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização	59
4.28	Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação da posição da cortina	60
4.29	Comparação do rácio de descarga com a variação da posição da cortina . .	61
4.30	Comparação do gradiente de saída com a variação da posição da cortina . .	62
5.1	Definição do modelo utilizado	64
5.2	Caudal e linhas equipotenciais com a variação do comprimento da cortina de drenagem	66

5.3	Variação da carga hidráulica com o aumento do comprimento da cortina de drenagem	67
5.4	Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com o aumento do comprimento da cortina de drenagem	68
5.5	Desenvolvimento do gradiente saída ao longo do lado jusante	69
5.6	Valores do gradientes de saída máximo com o aumento do comprimento da cortina de drenagem	69
5.7	Caudal e linhas equipotenciais com a variação da inclinação das cortinas . .	70
5.8	Variação da carga hidráulica com a inclinação das cortinas	71
5.9	Percentagem de variação da resultante de carga hidráulica e do rácio de descarga com a inclinação das cortinas	72
5.10	Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante	73
5.11	Valores do gradiente de saída máximo com a variação da inclinação das cortinas	73
5.12	Caudal e linhas equipotenciais com a variação da localização da cortina de drenagem	74
5.13	Variação da carga hidráulica com a localização da cortina de drenagem . .	75
5.14	Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a localização da cortina de drenagem	76
5.15	Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante	77
5.16	Valores do gradiente de saída com a variação da posição da cortina de drenagem	77
5.17	Comparação com os resultados obtidos por Mascarenhas (1979) relativamente à variação da carga hidráulica	79
5.18	Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina de drenagem	80
6.1	Representação da conversão dos eixos	83
6.2	Comparação dos resultados obtidos em todas as análises relativamente à resultante da carga hidráulica	85
6.3	Comparação dos resultados obtidos em todas as análises relativamente ao rácio de descarga	87
6.4	Comparação dos resultados obtidos em todas as análises relativamente ao máximo gradiente de saída	88

Lista de Tabelas

3.1	Exemplos de barragens de gravidade em Portugal	17
3.2	Parâmetros geométricos	17
3.3	Critérios para determinação do comprimento da cortina	19
3.4	Parâmetros da cortina de impermeabilização	19
3.5	Parâmetros da cortina de drenagem	20
3.6	Discretização da malha consideradas	26
3.7	Variação do caudal para as diferentes discretizações consideradas do modelo com cortina de impermeabilização	27
3.8	Variação do caudal para as diferentes discretizações consideradas do modelo com cortina de drenagem	29
3.9	Comparação dos resultados obtidos com a solução analítica de Ijam (2011) .	31
3.10	Resultados obtidos e comparação com a solução analítica de Andrade (1982)	33
4.1	Relações e valores utilizados no estudo paramétrico com cortina de impermeabilização	37
4.2	Variação do caudal com o aumento do comprimento da cortina	39
4.3	Variação do caudal com a inclinação da cortina de impermeabilização	43
4.4	Variação do caudal com a localização da cortina de impermeabilização	47
4.5	Variação do caudal com a alteração do coeficiente de permeabilidade da cortina	51
4.6	Estudo da influência do comprimento: modelos e relações utilizados	54
4.7	Estudo da influência da inclinação da cortina: Modelos e relações utilizados	57
4.8	Estudo posição da cortina: modelos e relações utilizados	60
5.1	Relações e valores utilizados no estudo paramétrico com cortina de impermeabilização e drenagem	65
5.2	Variação do caudal com o aumento do comprimento da cortina de drenagem	67
5.3	Variação do caudal com a inclinação das cortinas de impermeabilização e de drenagem	71
5.4	Variação do caudal com a alteração de posição da cortina de drenagem	75
5.5	Comparação da características do modelos de Mascarenhas (1979) e dos modelos utilizados	78
6.1	Conversão de valores no eixo das abcissas	84

Lista de Símbolos

F_1	Resultante das pressões hidrostáticas no paramento de montante
F_2	Resultante das pressões hidrostáticas no paramento de jusante
H	Altura de água a montante
H	Diferença entre a altura de água a montante e jusante - Ijam (2011)
H_1	Altura de água a montante - Ijam (2011)
H_b	Altura da barragem
H_d	Carga hidráulica na cortina de drenagem
$H_j d$	Altura de água a jusante - Andrade (1982)
H_m	Altura de água a montante - Andrade (1982)
L_b	Comprimento da base da barragem
L_c	Comprimento da cortina de impermeabilização
L_d	Comprimento da cortina de drenagem
L_j	Comprimento do lado jusante
L_m	Comprimento do lado montante montante
L_t	Comprimento total do modelo
NPA	Nível de pleno armazenamento
P	Resultante do peso próprio
P_r	Pressão - Ijam (2011)
Q	Caudal
S_d	Valor médio da carga hidráulica na linha de drenos - Andrade (1982)
U	Resultante das pressões da água na base da barragem
\overline{CD}	Cota da boca dos drenos - Andrade (1982)
a	Espaçamento entre drenos

b	Comprimento da base da barragem - Ijam (2011)
b	Distância desde o paramento de jusante até à cortina - Andrade (1982)
b_1	Distância desde o paramento de montante até à cortina Ijam (2011)
d	Distância desde o paramento de montante até à cortina - Andrade (1982)
d_j	Distância da cortina ao paramento jusante
d_m	Distância da cortina ao paramento montante
i	Gradiente hidráulico
k_c	Permeabilidade da cortina de impermeabilização
k_s	Permeabilidade do solo de fundação
q_d	Caudal retido pelos drenos - Andrade (1982)
q_j	Caudal de jusante - Andrade (1982)
q_m	Caudal de montante - Andrade (1982)
s	Comprimento da cortina - Ijam (2011)
t_i	Coordenadas do ponto i após a transformação de Schwarz-Christoffel - Ijam (2011)
x_c	Posição da cortina de impermeabilização
x_d	Posição da cortina de drenagem
y	Cota do plano - Ijam (2011)
z	Cota do nível de referência
ΔH	Diferença de Carga Hidráulica
γ	Valor do ângulo em π radianos - Ijam (2011)
γ_w	Peso volúmico da água
λ	Fator de forma dos drenos
θ_c	Inclinação das cortinas
p	Perímetro dos drenos
FV	Fator de variação
RCH	Resultante da carga hidráulica
RD	Rácio de descarga

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

O terreno de fundação das barragens de betão deve apresentar boas características mecânicas, nomeadamente, os maciços rochosos para fazer face à carga vertical proveniente do peso da barragem e conferir estabilidade. Estes maciços, encontram-se naturalmente alterados e fraturados por superfícies de descontinuidade que apresentam, em geral, maior expressão à superfície. Devido a estas condicionantes geológicas, a superfície de contacto betão-fundação está sujeita a subpressões, devido ao fato de a água percolar através das descontinuidades. De modo a não colocar em causa a estabilidade da estrutura, é imprescindível a consideração do efeito das subpressões na fundação da barragem, nas diferentes etapas de projeto.

Outro dos requisitos fundamentais a considerar para a estabilidade da barragem está relacionado com o controlo do fluxo de água que passa pela fundação das barragens do tipo gravidade. Ressalta assim a importância do estudo das condições de escoamento nas fundações deste tipo de estruturas.

Neste sentido, é habitual em praticamente todas as fundações das grandes barragens de betão, a construção de uma (ou mais) cortinas de impermeabilização complementadas com uma adequada rede de drenagem, no sentido de controlar as subpressões, caudais e gradientes hidráulicos.

No caso de Portugal, é o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007), que define as normas relativas ao projeto, à construção, à exploração, à observação e à inspeção de barragens visando garantir o seu cumprimento e boa execução.

O tratamento da fundação inclui, no caso geral, cortinas de impermeabilização e de drenagem e injeções de consolidação. Quando são analisadas as ações da água, o regulamento já tem em consideração a utilização destes dispositivos de dissipação de energia.

1.2 Objetivo da dissertação

Uma vez que as cortinas de impermeabilização e de drenagem são dispositivos praticamente obrigatórios em projetos de barragens, pretende-se verificar a influência destes dispositivos de dissipação de energia quando se altera o seu comprimento, inclinação, localização e permeabilidade.

Para tal, abordou-se algumas soluções analíticas disponíveis para a avaliação do desempenho destes dispositivos que são posteriormente comparadas com os resultados de dois casos de estudo, implementados num programa de cálculo automático, onde se pretende verificar se existe concordância dos resultados obtidos no programa e nas soluções analíticas.

Após validar os resultados do programa, realizou-se uma análise paramétrica, onde se considerou vários comprimentos, inclinações e posições para as cortinas de impermeabilização e de drenagem. Para as cortinas de impermeabilização considerou-se ainda vários coeficientes de permeabilidade. Obteve-se resultados relativos à carga hidráulica, caudal e gradiente hidráulico. Pretende-se assim obter um cruzamento de resultados, de modo a precisar a melhor forma de utilização destes dispositivos, de acordo com os resultados das análises.

Pretende-se por último validar as análises efetuadas, através de um estudo comparativo com diversos autores que realizaram estudos semelhantes, de modo a verificar se existe uma conformidade de resultados.

1.3 Organização da dissertação

No capítulo 1 apresenta-se algumas considerações sobre os maciços de fundação das barragens e os seus efeitos. Termina-se com os objetivos da dissertação e a organização da mesma.

No capítulo 2 descreve-se as ações que atuam numa barragem e os efeitos das cortinas de impermeabilização e de drenagem. Apresenta-se duas soluções analíticas, uma para a cortina de impermeabilização proposta por Ijam (2011) e outra proposta por Andrade (1982) para a cortina de drenagem. Termina-se o capítulo com a descrição dos fenómenos

1.3 Organização da dissertação

de instabilidade hidráulica.

No capítulo 3 pretende-se calibrar dois modelos base, um com cortina de impermeabilização e outro com cortina de drenagem, nas condições referidas nas soluções analíticas propostas pelos autores apresentados no capítulo 2. Inicia-se com a definição das propriedades dos modelos, descrevendo as suas características geométricas e propriedades do maciço de fundação e das cortinas de impermeabilização e de drenagem. Implementa-se estes modelos no programa de cálculo automático, descrevendo todos os passos para a sua completa definição e a forma como se obtém os resultados no programa. Verifica-se ainda se a discretização da malha gerada pelo programa de elementos finitos (SEEP/W[®]) tem influência nos resultados obtidos e compara-se estes resultados com os das soluções analíticas.

No capítulo 4 caracteriza-se o modelo estudado com cortina de impermeabilização. Realiza-se a análise paramétrica e verifica-se a influência do comprimento, inclinação, posição e permeabilidade da cortina de impermeabilização no controlo da carga hidráulica, caudal e gradiente hidráulico. Resume-se os resultados obtidos indicando, para todos os parâmetros, qual a melhor relação. Compara-se o trabalho desenvolvido com outros autores que abordaram o mesmo assunto.

No capítulo 5 caracteriza-se o modelo, desta vez com uma cortina de impermeabilização, cujas características não sofrem alterações, e de drenagem. Realiza-se a análise paramétrica e verifica-se a influência do comprimento, inclinação e posição da cortina de drenagem no controlo da carga hidráulica, caudal e gradiente hidráulico. Reúne-se os resultados obtidos, indicando em todos os parâmetros qual a melhor relação. Compara-se o trabalho desenvolvido com outros autores que abordaram o mesmo assunto.

No capítulo 6 descreve-se o procedimento necessário realizar, de modo a ser possível a comparação dos resultados obtidos no capítulo 4 e no capítulo 5. Assim, foi possível analisar a influência da introdução da cortina de impermeabilização e de drenagem no desenvolvimento da carga hidráulica, do caudal e do gradiente de saída.

No capítulo 7 apresenta-se as conclusões gerais do estudo efetuado e apresenta-se algumas sugestões para estudos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 Introdução

No presente capítulo é feita uma abordagem geral das ações que atuam numa barragem de betão do tipo gravidade. Entre essas ações é dada especial importância às subpressões, às causas do seu aparecimento e ainda à forma como funcionam os dispositivos de dissipação de energia que visam reduzir os seus efeitos. Entre estes dispositivos destaca-se as cortinas de impermeabilização e as cortinas de drenagem. Descreve-se duas soluções analíticas, uma da autoria de Ijam (2011), que propõe um método para a determinação do desenvolvimento das subpressões na base da barragem quando se recorre a cortinas de impermeabilização e a segunda, da autoria de Andrade (1982), que determina a variação do caudal no solo de fundação quando se utiliza cortinas de drenagem. Termina-se o capítulo descrevendo os fenómenos da instabilidade hidráulica, nomeadamente o efeito piping e a verificação da segurança ao mesmo.

2.2 Ações a considerar nas barragens

A percolação da água nas fundações rochosas faz-se pelas zonas compartimentadas, induzindo perdas de água a jusante, o que provoca pressões nas superfícies de descontinuidade da fundação, designadas por subpressões. Nas superfícies potenciais de deslizamento da vizinhança da base da barragem, as subpressões traduzem-se numa resultante ascendente, reduzindo as tensões normais e, conseqüentemente, as forças resistentes de atrito. (Pereira, 2011)

As cortinas de impermeabilização têm como principais funções a redução da infiltração da água no maciço de fundação da barragem pelas zonas fraturadas, reduzir os assentamentos e as subpressões e diminuir o potencial de erosão (Ruggeri, 2004; Fell et al., 2005). A cortina de impermeabilização consiste na execução de um ou vários furos, sub verticais, desde a base da barragem até à profundidade desejada e posterior enchimento desses furos com caldas de cimentos, ou de outros materiais, sob pressão com o objetivo de intersectar o máximo número de descontinuidades do maciço de fundação, entre os quais fraturas, falhas e juntas (Murthy, 2003; Fell et al., 2005).

As cortinas de drenagem, são constituídas por furos igualmente espaçados, devendo ser dispostos logo a jusante da cortina de impermeabilização, de forma a recolher a água que contorna esta última e encaminhá-la para redes de drenagem que a dirigem para fora do solo de fundação. Este sistema revela-se como dos mais influentes para redução das subpressões e com maior eficácia comparativamente com as cortinas de impermeabilização.

Na figura 2.1 apresenta-se um perfil transversal típico de uma barragem de gravidade com os dispositivos de dissipação de energia (cortinas de impermeabilização e drenagem) referido anteriormente. Para avaliação da eficácia conjunta do sistema de impermeabilização e de drenagem devem ser instalados piezómetros a jusante das cortinas, para permitir a medição das subpressões (Pereira, 2011).

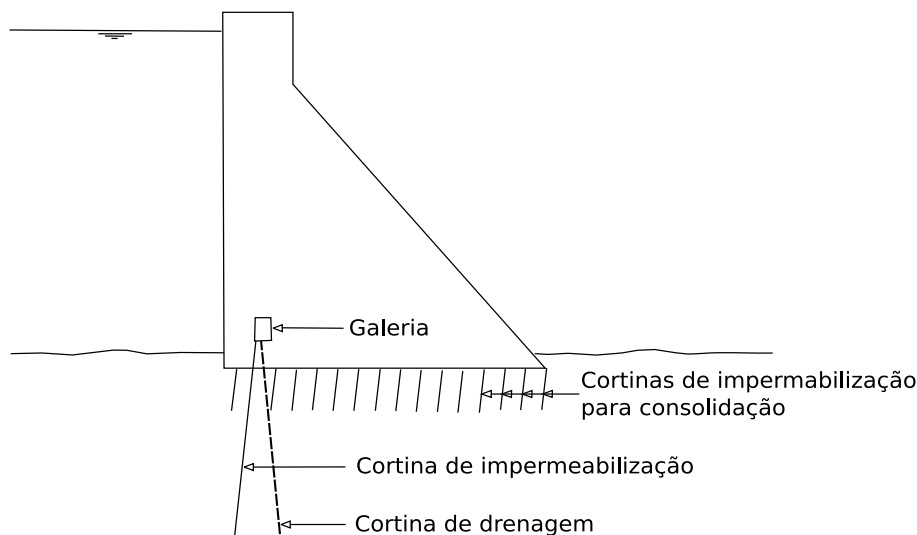


Figura 2.1: Perfil transversal típico de uma barragem
(Adaptado de Fell et al. (2005))

Para a determinação das subpressões é necessário definir a forma provável do diagrama que irá atuar na base da barragem. Este diagrama é diretamente influenciado pela altura

2.3 Dispositivos para controlo das subpressões

de água a montante e a jusante da barragem. À medida que a água desenvolve o seu movimento no solo em direção a jusante, ocorrem perdas de energia, até que a subpressão iguala a pressão de água existente a jusante da barragem. Admitindo que o solo de fundação é homogéneo, o diagrama de subpressões apresenta uma forma aproximadamente linear. Na figura 2.2 apresenta-se as resultantes das pressões hidrostáticas nos paramentos da barragem (F_1 e F_2), a resultante do peso próprio (P) e a resultante das pressões da água na base da barragem (U). Na mesma figura, H_m e H_j representam a altura de água a montante e jusante, respetivamente.

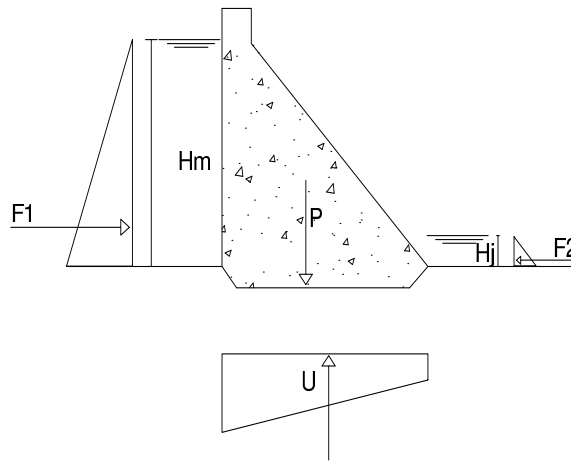


Figura 2.2: Diagramas de pressões que atuam numa barragem

2.3 Dispositivos para controlo das subpressões

2.3.1 Efeito da cortina de impermeabilização

Relativamente ao efeito das cortinas de impermeabilização nas subpressões, a sua função passa pela criação de uma barreira de modo a impedir a circulação de água na fundação das barragens, ou apenas reduzi-la até um ponto em que possa ser controlada através de sistemas de drenagem.

Assim, a criação desta barreira impõe um percurso da água, de montante para jusante, mais longo, uma vez que esta é obrigada a contornar a cortina, provocando a perda de carga hidráulica e, consequentemente, um decréscimo do valor das subpressões na zona onde a cortina se localiza. A configuração típica de um diagrama de subpressões quando se utiliza cortinas de impermeabilização encontra-se na figura 2.3.

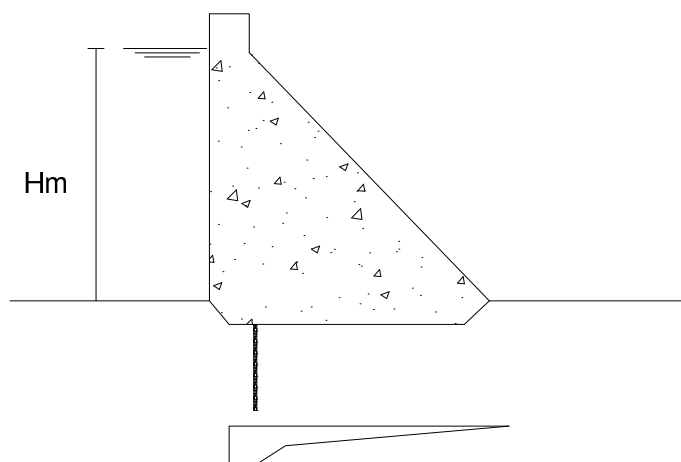


Figura 2.3: Subpressões com cortina de impermeabilização

2.3.2 Efeito da cortina de drenagem

O sistema adicional ideal para complementar a solução de impermeabilização será a colocação de um sistema de drenagem, a jusante da cortina, com o objetivo de recolher a água que tende a afastar-se da cortina de impermeabilização e posterior encaminhamento para redes de drenagem.

As cortinas de drenagem são constituídas por furos igualmente espaçados e consistem na criação de uma área com pressão atmosférica dentro da fundação para a qual convergem as linhas de fluxo. Este sistema revela-se bastante eficaz na redução das subpressões (Bowles, 1997), redução esta que dependerá diretamente da competência do sistema de drenagem, do afastamento existente entre os drenos, da permeabilidade do maciço de fundação e de outros fatores relacionados com o projeto e com a boa execução deste tipo de soluções no interior do maciço. A configuração de um sistema com cortinas de impermeabilização e de drenagem e a sua função na redução das subpressões encontra-se representado na figura 2.4.

2.4 Soluções analíticas

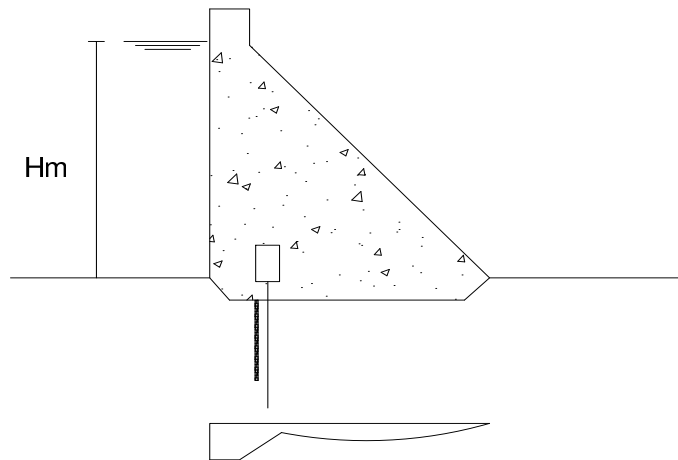


Figura 2.4: Subpressões com cortina de impermeabilização e drenagem

2.4 Soluções analíticas

2.4.1 Determinação da carga hidráulica com cortina de impermeabilização - Solução de Ijam

A solução analítica de Ijam (2011) permite a obtenção do valor da carga hidráulica na base da barragem com uma cortina de impermeabilização, dependendo da sua localização, comprimento e inclinação. Esta solução analítica parte da transformação do plano onde a base da estrutura está definida para um novo plano (plano t) através da transformação de Schwarz-Christoffel (figura 2.5). Neste novo plano, é possível a obtenção do valor da carga hidráulica em cada ponto desde que conhecidas as suas coordenadas. Na mesma figura, o ponto B representa o ponto do paramento de montante da barragem, C o ponto do lado montante da cortina, E o ponto do lado jusante da cortina e F o ponto do paramento de jusante da barragem. Pretende-se calcular o valor da carga hidráulica nestes pontos, de modo a conseguir determinar o desenvolvimento da carga hidráulica ao longo da base da barragem.

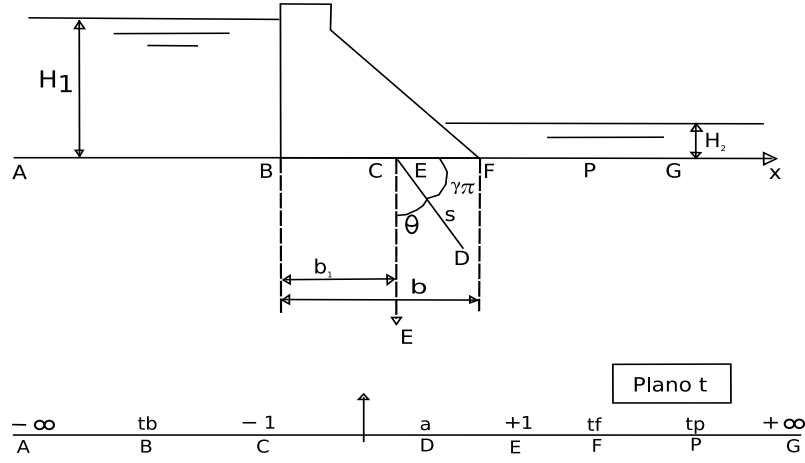


Figura 2.5: Transformação de plano de Schwarz-Christoffel
(Adaptado de Ijam (2011))

Inicialmente é necessário determinar o valor das coordenadas de cada ponto, neste caso B, C, E e F, no novo plano t conforme indicado na figura 2.5. Neste plano, os pontos C e E encontram-se perfeitamente definidos e as suas coordenadas assumem os valores de -1 e +1, respetivamente. As coordenadas dos ponto B e F são definidas através das seguintes equações:

$$-\frac{b_1}{s} = \left[\frac{(t_b + 1)}{2 - 2\gamma} \right]^{1-\gamma} \cdot \left[\frac{(t_b - 1)}{2\gamma} \right]^{\gamma} \quad (2.1)$$

$$\frac{b - b_1}{s} = \left[\frac{(t_f + 1)}{2 - 2\gamma} \right]^{1-\gamma} \cdot \left[\frac{(t_f - 1)}{2\gamma} \right]^{\gamma} \quad (2.2)$$

onde,

- b - comprimento da base da barragem
- b_1 - distância desde montante até à posição da cortina de impermeabilização
- s - comprimento da cortina
- t_b e t_f - coordenadas dos pontos após a transformação de plano
- γ - valor do ângulo que a cortina de impermeabilização faz com o lado jusante da base da barragem, em radianos.

2.4 Soluções analíticas

A determinação do valor da carga hidráulica para os pontos mencionados é dado pela equação 2.3, após a determinação dos valores das coordenadas em cada ponto no novo plano.

$$\frac{P_r}{\gamma_w} = H_1 + y - \frac{H}{2} - \frac{H}{\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{2t - t_b - t_f}{t_f - t_b} \right) \quad (2.3)$$

onde,

- P_r - pressão
- γ_w - peso volúmico da água
- H_1 - altura de água a montante
- y - cota do plano onde se pretende calcular o valor da carga hidráulica
- H - diferença entre a altura de água a montante e a jusante
- t - coordenada do ponto onde se pretende calcular o valor da carga hidráulica

A determinação dos valores da carga hidráulica nos pontos B C E e F, permite uni-los e obter o diagrama na base da barragem, percebendo assim o efeito da cortina de impermeabilização na redução desta grandeza. Esta solução analítica será utilizada no capítulo 3 para comparar os valores obtidos com os do programa de cálculo automático.

2.4.2 Determinação de caudais com cortina de drenagem - Solução de Andrade

A solução de Andrade (1982) não permite a obtenção do valor da carga hidráulica, mas sim a obtenção do valor dos caudais quando se utiliza uma cortina de drenagem. Andrade (1982) propôs uma solução onde, a partir da determinação do valor médio da carga hidráulica na linha de drenos, é possível determinar o valor do caudal de montante, dos drenos e de jusante. O modelo utilizado por Andrade (1982), representado na figura 2.6, supõe que a barragem é impermeável e que se encontra sobre uma camada finita, permeável, homogênea e isotrópica e onde a linha de drenos atinge um estrato impermeável. O fluxo parte de uma fenda a montante, onde se estabelece a pressão da albufeira a montante até uma fenda localizada a jusante, onde se estabelece a pressão da albufeira a jusante. O escoamento é laminar e a lei de Darcy é válida (Andrade, 1982).

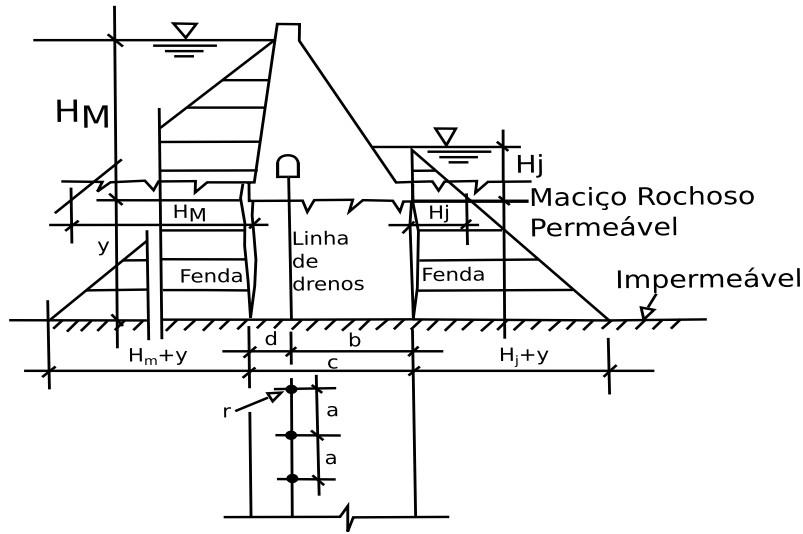


Figura 2.6: Modelo utilizado
(Adptado de Andrade (1982))

Neste modelo, o caudal que flui de montante (q_m) é igual á soma do caudal que flui para os drenos (q_d) com o que flui para jusante (q_j). Assim,

$$q_m = q_d + q_j \quad (2.4)$$

com,

$$q_m = k \cdot \frac{H_m - S_d}{d} \cdot a \quad (2.5)$$

$$q_d = k \cdot \lambda \cdot (S_d - \overline{CD}) \cdot a \quad (2.6)$$

$$q_j = k \cdot \frac{S_d - H_j}{b} \cdot a \quad (2.7)$$

onde,

- q_m - caudal de montante
- q_d - caudal escoado pelos drenos
- q_j - caudal que chega a jusante

2.4 Soluções analíticas

- k - permeabilidade do meio
- a - espaçamento entre drenos

O valor médio da carga hidráulica na linha de drenos é determinado através da equação 2.8.

$$S_d = \frac{b \cdot d \cdot \lambda \cdot \overline{CD} + H_m \cdot b + H_j \cdot d}{b \cdot d \cdot \lambda + c} \quad (2.8)$$

onde

- S_d - valor médio da carga hidráulica na linha de drenos
- b - distância entre a cortina de drenagem e o paramento de jusante
- d - distância entre a cortina de drenagem e o paramento de montante
- λ - fator de forma da linha de drenos
- \overline{CD} - cota da boca de drenos
- H_m - altura de água a montante
- H_j - altura de água a jusante
- c - comprimento da base da barragem

O parâmetro λ é um fator que tem em conta o diâmetro dos drenos e o espaçamento existente entre eles e pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{2\pi}{a \ln \frac{a}{p}} \quad (2.9)$$

onde

- a - espaçamento longitudinal entre drenos
- p - perímetro dos drenos

2.5 Instabilidade hidráulica

Os fenómenos de instabilidade hidráulica podem assumir duas formas distintas: rutura hidráulica ou erosão interna ("piping"). Relativamente ao fenómeno do "piping", também denominado de erosão interna, está associado a elevados gradientes hidráulicos. Este fenómeno provoca o deslocamento progressivo de partículas no interior do solo, favorecendo a formação de "galerias" vazias. Quando a água que se desloca no maciço de fundação, alcança estas vias preferenciais, a velocidade do fluxo aumenta e assim vai erodindo cada vez mais, ou seja, a "galeria" vai aumentando as suas dimensões até que atinge a sua capacidade limite de suporte, provocando o colapso da estrutura (Das, 2008).

Assim, no estudo realizado, compara-se os valores máximos do gradiente de saída de modo a verificar a sua variação ao longo das análises realizadas, tendo presente que quanto menor for este valor, menor serão as hipóteses do fenómeno "piping" se concretizar.

Capítulo 3

Modelos Base

3.1 Introdução

Com o objetivo de verificar se os resultados obtidos no programa de cálculo automático (SEEP/W[®]) a utilizar na presente dissertação reproduzem de forma apropriada as soluções analíticas descritas em 2.4, define-se dois modelos, um com cortina de impermeabilização e outro com cortina de drenagem. Os resultados obtidos no modelo com cortina de impermeabilização foram comparados com a solução analítica de Ijam (2011) (referida em 2.4.1) que permite obter valores da carga hidráulica ao longo da base da barragem. Os resultados obtidos no modelo com cortina de drenagem foram comparados com a solução analítica de Andrade (1982) (referida em 2.4.2) que permite obter os valores do caudal de montante, de jusante e do que flui para os drenos através da determinação do valor médio da carga hidráulica na linha de drenos.

Para a definição dos modelos é explicada a escolha da geometria dos modelos, das propriedades do maciço de fundação e das propriedades das cortinas de impermeabilização e de drenagem. Especifica-se os procedimentos necessários à implementação dos modelos no programa em termos de geometria, de características dos materiais e das condições de fronteira. Descreve-se a forma como se obtiveram os resultados relativos à carga hidráulica, ao caudal e ao gradiente de saída. Para a carga hidráulica e caudal, apresenta-se uma relação que permite comparar os efeitos das cortinas nestas grandezas.

Para verificar se o nível de discretização da malha de elementos finitos não influencia os resultados obtidos, utiliza-se 3 malhas diferentes nos dois modelos base e compara-se os resultados. Por fim, compara-se com a solução analítica de Ijam (2011) os resultados obtidos no programa relativamente à carga hidráulica, para o modelo com cortina de impermeabi-

lização e com a solução analítica de Andrade (1982) os resultados relativos ao caudal, do modelo com cortina de drenagem.

3.2 Definição dos modelos base

3.2.1 Introdução

Na figura 3.1 encontra-se a representação esquemática dos modelos base.

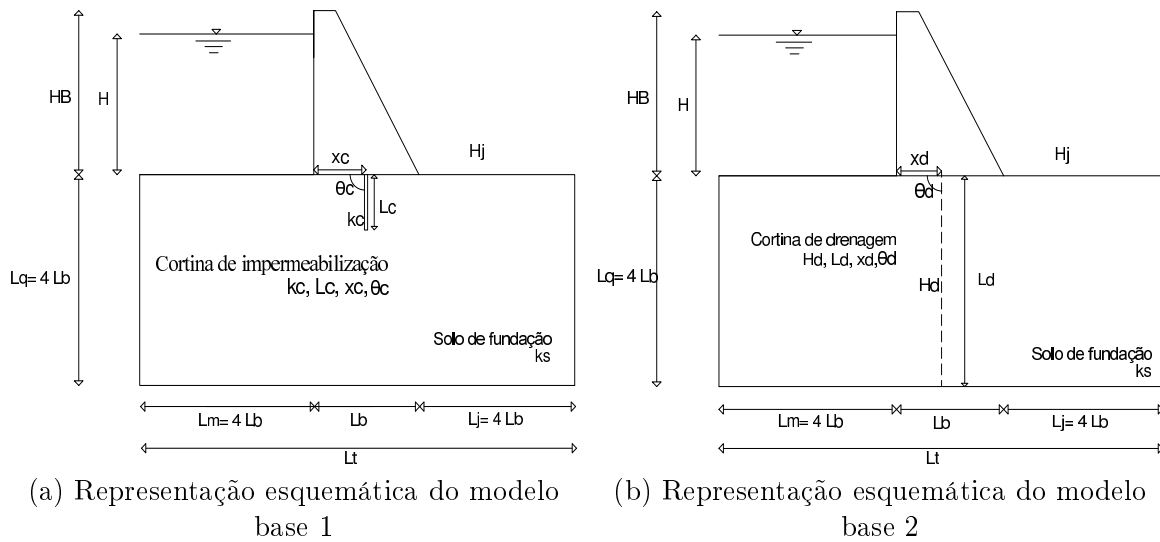


Figura 3.1: Representação esquemática dos modelos utilizados

Estes modelos apresentam as seguintes características:

- Modelo Base 1 (MB1): considera a utilização da cortina de impermeabilização e os resultados obtidos serão comparados com a solução analítica de Ijam (2011).
- Modelo Base 2 (MB2): considera a utilização da cortina de drenagem e os resultados obtidos serão comparados com a solução de Andrade (1982).

Os parâmetros geométricos indicados na figura 3.1 são definidos em seguida bem como as propriedades do terreno de fundação e as propriedades das cortinas de impermeabilização e de drenagem, justificando as razões das suas escolhas.

3.2 Definição dos modelos base

3.2.2 Propriedades geométricas dos modelos base

Relativamente à geometria da barragem dos modelos base, procurou-se que sejam representativas das barragens de betão, do tipo gravidade, existentes em Portugal. Deste modo, através da informação disponibilizada pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), apresenta-se na tabela 3.1 um resumo das dimensões da base e da altura de água a montante (NPA) de algumas barragens portuguesas.

Tabela 3.1: Exemplos de barragens de gravidade em Portugal

Barragem	Comprimento da base (m)	Altura de água a montante(m)
Pedrogão	28,75	34,5
Póvoa	30	32
Alto Cávado	30	26
Valeira	26	50
Andorinhas	22	19
Guilhofrei	37,5	42
Nunes	45	21,5
Fratel	18,75	43

Tendo em conta as barragens analisadas, considerou-se que a altura da barragem dos modelos base será suficiente para acondicionar 40 metros de água a montante, sem presença de água a jusante e com um comprimento da base da barragem de 40 metros .

Quanto ao maciço de fundação, considerou-se que este deve ter de profundidade, comprimento a montante e comprimento a jusante uma dimensão igual a 4 vezes o comprimento da base da barragem. Deste modo, o modelo possui largura e altura suficiente para que não haja interferência das condições de fronteira que serão definidas no programa de cálculo automático.

Na tabela 3.2 resume-se os parâmetros indicados na figura 3.1 e os valores adotados.

Tabela 3.2: Parâmetros geométricos

Parâmetro	Designação utilizada	Valor adotado (m)
Carga hidráulica a montante	H	40
Carga hidráulica a jusante	H_j	0
Comprimento da base da barragem	L_b	40
Comprimento do lado montante	L_m	160
Comprimento do lado jusante	L_j	160
Profundidade do maciço de fundação	L_q	160

3.2.3 Propriedades do maciço de fundação

Como referido na secção 1.1, as barragens do tipo gravidade devem ser fundadas em terrenos com características mecânicas adequadas, nomeadamente maciços rochosos. Assim, os modelos base considerados contam com um terreno de fundação com boas características mecânicas de modo a que não existam problemas de estabilidade.

Segundo Mascarenhas (1979), a permeabilidade dos materiais com este tipo de características é, geralmente, muito reduzida com valores frequentemente na ordem dos 10^{-7} a $10^{-10} m \cdot s^{-1}$. No entanto, devido a processos geológicos, o autor verificou que nos primeiros 100 metros de profundidade, estes materiais encontram-se bastante alterados tendo assim afirmado que a permeabilidade nestes metros iniciais varia entre 10^{-3} a $10^{-5} m \cdot s^{-1}$. O valor do coeficiente de permeabilidade adotado para o terreno de fundação (k_s) a considerar nos modelos base será de $k_s = 10^{-5} m \cdot s^{-1}$, uma vez que uma barragem de betão implica um terreno de fundação minimamente competente como já foi evidenciado. Refere-se ainda, que o modelo considerado é isotrópico em relação à permeabilidade, que o terreno se encontra saturado e que a percolação ocorre em regime estacionário.

3.2.4 Propriedades das cortinas de impermeabilização e de drenagem

Mikkelsen (2002) abordou as características de permeabilidade dos materiais que constituem a cortina de impermeabilização. Dos vários materiais apresentados, verificou que o coeficiente de permeabilidade pode assumir valores na ordem dos 10^{-8} a $10^{-11} m/s$. Dado o intervalo encontrado, adotou-se para a cortina de impermeabilização um valor igual a $k_c = 10^{-8} m/s$.

O comprimento da cortina de impermeabilização pode variar bastante uma vez que depende de diversos fatores, mas a determinação do comprimento ideal é fundamental para um tratamento eficaz (Gama, 2012).

Para determinar o comprimento da cortina, consultaram-se vários critérios que se encontram representados na tabela 3.3.

3.2 Definição dos modelos base

Tabela 3.3: Critérios para determinação do comprimento da cortina

	Critério	Definição	$L_c(H = 40m)$
U.S.B.R. (2012)	$L_c = 1/3 * H + C$ com $C \in [8; 25]$	L_c - comprimento da cortina de impermeabilização	21,3
B.I.S. (1993)	$L_c = 2/3 * H + 8$	H-carga hidráulica	34,7
Ewert (2003)	$L_c = H$	C- constante	40,0
RIDAS (2007)	$L_c = 1/3 * H$		13,3
H > 30 m	$L_c = 2/3 * H$		26,7

Dado os valores encontrados relativamente ao comprimento da cortina de impermeabilização, em função da carga hidráulica, atribuiu-se um comprimento de 20 metros para a cortina de impermeabilização do modelo base 1.

Segundo Fell et al. (2005), a cortina de impermeabilização deve ser executada o mais próximo possível do lado de montante da barragem. No entanto, a cortina não se deve localizar muito perto do paramento de montante, uma vez que podem surgir trações nesta zona que podem levar a cortina á rotura. Assim, definiu-se que a distância entre a cortina e o paramento de montante seria de 8 metros.

Na tabela 3.4 resume-se os parâmetros referentes à cortina de impermeabilização indicados na figura 3.1 e os valores adotados.

Tabela 3.4: Parâmetros da cortina de impermeabilização

Parâmetro	Designação	Valor adotado
Coefficiente de permeabilidade da cortina	k_c	$10^{-8} m \cdot s^{-1}$
Comprimento da cortina	L_c	20 metros
Distância entre o paramento de montante e a cortina	x_c	8 metros

A cortina de drenagem deve situar-se imediatamente a jusante da cortina de impermeabilização. Como o segundo modelo base não utiliza cortina de impermeabilização, para ser possível a comparação com a solução analítica de Andrade (1982), optou-se por colocar a cortina de drenagem no lugar desta.

Relativamente ao seu comprimento, e como referido na secção 2.4.2, para comparação com a solução analítica Andrade, 1982, foi considerado igual à profundidade do maciço de fundação, o que corresponde a 160 metros.

A caracterização da cortina de drenagem passa pela determinação da carga hidráulica no local onde esta se encontra, como referido na secção 2.4.2. Recorrendo à solução analítica de Andrade (1982), mais concretamente à equação 2.9, começa-se por determinar o fator de forma λ . Este fator depende do diâmetro e do espaçamento existente entre os drenos. Admitindo os valores utilizados por Andrade (1982) e por Farinha (2009), para comparação com ensaios *in situ* da barragem do Alqueva, adotou-se um diâmetro de 0,076 metros para os drenos, espaçados de 3 metros.

Assim,

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot \ln \frac{3}{\pi \cdot 0,076}} \rightarrow \lambda = 0,8275$$

Tendo em conta que:

- Comprimento da base da barragem = 40 metros
- Distância da cortina ao paramento de montante = 8 metros
- Distância da cortina ao paramento de jusante = 32 metros
- Fator de forma $\lambda = 0,8275$

Assim, é possível determinar o valor da carga hidráulica na linha de drenos de acordo com a equação 2.8.

$$H_d = \frac{32 \cdot 8 \cdot 0,8275 \cdot 0 + 40 \cdot 32 + 0 \cdot 8}{32 \cdot 8 \cdot 0,8275 + 40} \rightarrow H_d = 5,08 \text{ metros}$$

Na tabela 3.5 resume-se os parâmetros referentes à cortina de drenagem indicados na figura 3.1 e os valores adotados.

Tabela 3.5: Parâmetros da cortina de drenagem

Parâmetro	Designação	Valor adotado (m)
Carga hidráulica na cortina de drenagem	H_d	5,08
Comprimento da cortina de drenagem	L_d	160
Distância da cortina de drenagem ao paramento de montante	x_d	8

3.3 Modelação no SEEP/W[®]

3.3.1 Implementação dos modelos base

Na figura 3.2 apresenta-se os modelos base implementados no SEEP/W[®].

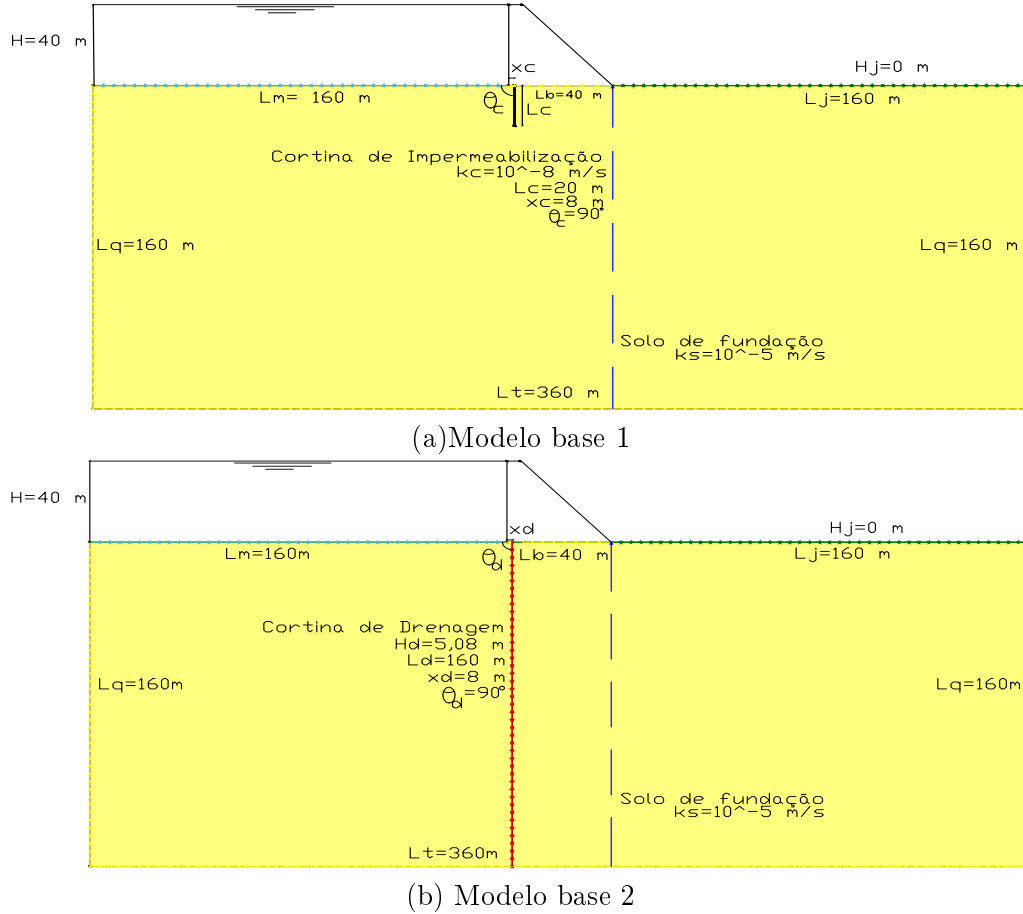


Figura 3.2: Modelos base modelados no SEEP/W[®]

Para implementar os modelos no SEEP/W[®] foi necessário definir a geometria, as características dos materiais e as condições de fronteira.

Após a definição da geometria, foi necessário definir regiões, uma vez que a cada região atribui-se um material com características definidas. No caso do modelo base 1, foram definidas duas regiões: uma para o maciço de fundação e outra para a cortina de impermeabilização. No caso do modelo base 2 só foi definida a região do maciço de fundação, uma vez que a cortina de drenagem é definida em termos de carga hidráulica, como referido anteriormente. Para o maciço de fundação definiu-se, em ambos os modelos, um material

com um coeficiente de permeabilidade de $10^{-5} m \cdot s^{-1}$ e para a cortina de impermeabilização um material com $10^{-8} m \cdot s^{-1}$, como indicado na figura 3.2.

Na figura 3.3 é possível observar os 2 materiais implementados no SEEP/W[®] (um para o terreno de fundação e outro para a cortina de impermeabilização) e ainda as características de permeabilidade da cortina de impermeabilização.

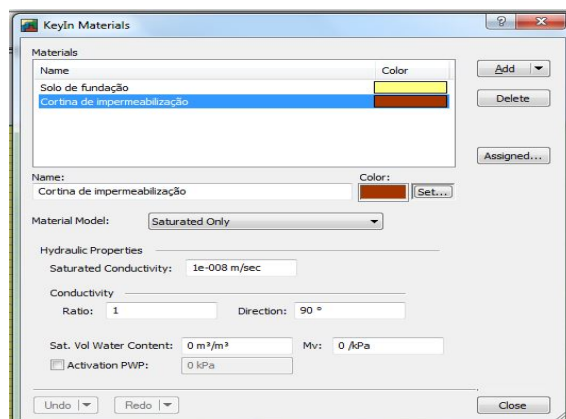


Figura 3.3: Materiais definidos e suas características

O SEEP/W[®] disponibiliza vários tipos de condições de fronteira. Na figura 3.4 apresenta-se as condições de fronteira que foram estabelecidas. Para os casos em análise foram estabelecidos dois tipos de condições de fronteira: em termos de carga hidráulica e em termos de caudal. Estas duas condições foram utilizadas na definição do modelo no programa de cálculo automático e serão descritas em seguida.

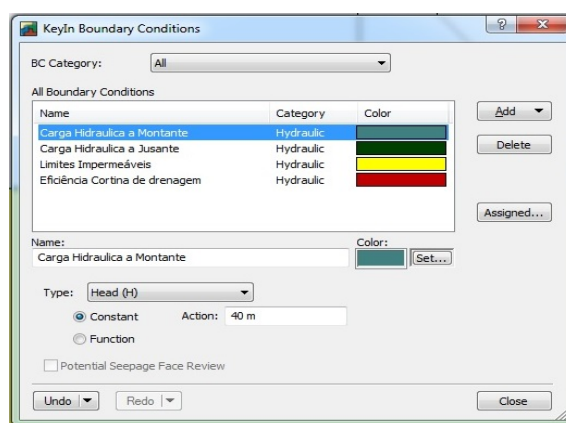


Figura 3.4: Condições de fronteira definidas

Os limites indicados na figura 3.2 com L_q , L_t e L_b , correspondem a limites impermeáveis. Desta forma, indica-se ao programa que nenhum fluxo vai ser adicionado ou removido nas

3.3 Modelação no SEEP/W[®]

zonas seleccionadas. Para estabelecer esta condição foi necessário definir no SEEP/W[®], através da opção das condições de fronteira, que o caudal que podia atravessar estas fronteiras é nulo.

Na mesma figura, L_m e L_j foram definidos através da carga hidráulica e correspondem à carga hidráulica a montante e a jusante, respetivamente. No SEEP/W[®], definiu-se nas condições de fronteira que o limite L_m apresenta uma carga hidráulica de 40 metros e que a carga hidráulica no limite L_j é nula.

No segundo modelo base, a linha vermelha, do lado montante e com comprimento igual à profundidade do maciço, representa a cortina de drenagem. A cortina de drenagem foi definida através da carga hidráulica. O valor da carga hidráulica estabelecido foi de 5,08, como calculado anteriormente na secção 3.2.4.

3.3.2 Obtenção de resultados

Para a realização desta dissertação é necessário obter resultados relativos à carga hidráulica, caudal e gradiente de saída, neste capítulo e nos capítulos dos estudos paramétricos. A título de exemplo, implementou-se no SEEP/W[®] o modelo com a geometria e as propriedades da figura 3.2 a), para uma breve descrição do modo de obtenção dos resultados.

Os valores da carga hidráulica foram obtidos ao longo da linha da base da barragem (L_b). Na figura 3.5, pode observar-se em ordenadas, os valores da carga hidráulica e em abcissas o comprimento da base da barragem.

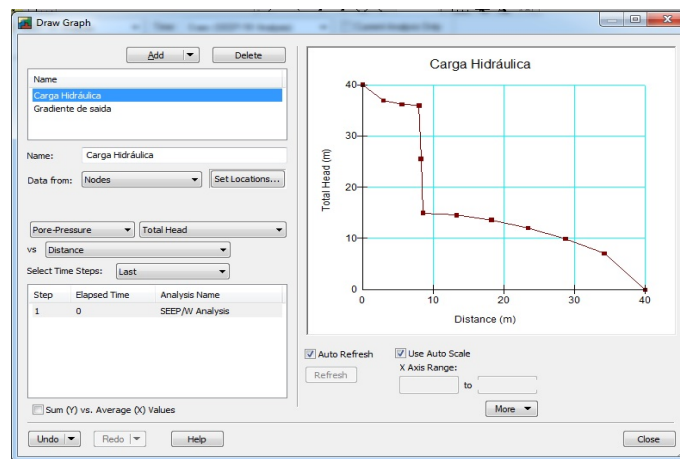


Figura 3.5: Obtenção do desenvolvimento da carga hidráulica no SEEP/W[®]

Para verificar os efeitos da utilização da cortinas de impermeabilização e de drenagem na variação da carga hidráulica, estabeleceu-se uma relação em termos da resultante da carga hidráulica (RCH), que corresponde à área total dos gráficos obtidos. Para tal, foi necessário dividir o gráfico em figuras geométricas simples de modo a determinar a área de cada uma. Um exemplo desta divisão pode ser observado na figura 3.6.

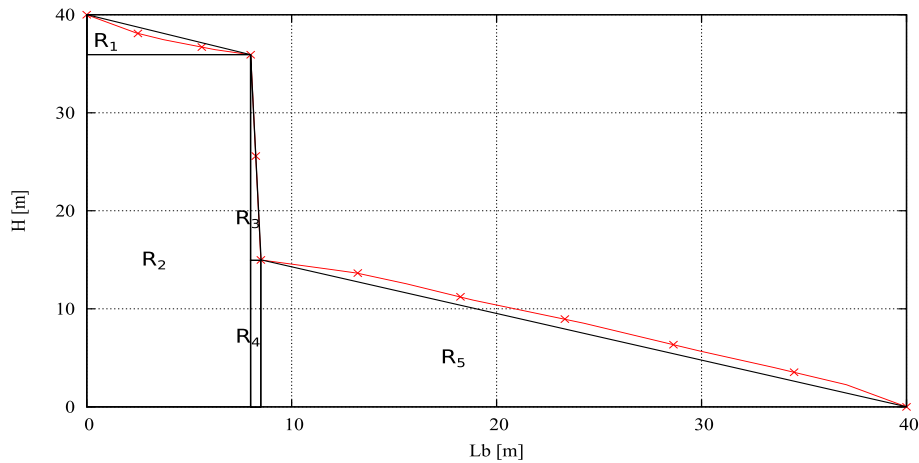


Figura 3.6: Exemplo da obtenção da resultante da carga hidráulica

A resultante corresponde à soma de todas as áreas, neste caso $RCH = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$.

Assim estabeleceu-se a seguinte relação:

$$PV(\%) = \frac{RCH_i}{RCH_{min}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

onde,

- PV - percentagem de variação
- RCH - resultante da carga hidráulica
- i - corresponde a cada relação do parâmetros considerados
- min - corresponde ao mínimo de cada conjunto de relações estudadas

Para obter o valor do caudal, apresenta-se na figura 3.7 a secção onde se obtém este valor, mais concretamente a linha azul a traço interrompido. Esta secção localiza-se naturalmente no fim da barragem, ou seja, depois da cortina de impermeabilização ou de drenagem. Este

3.3 Modelação no SEEP/W®

resultado vem por metro de desenvolvimento. Na mesma figura apresenta-se o valor do caudal obtido.

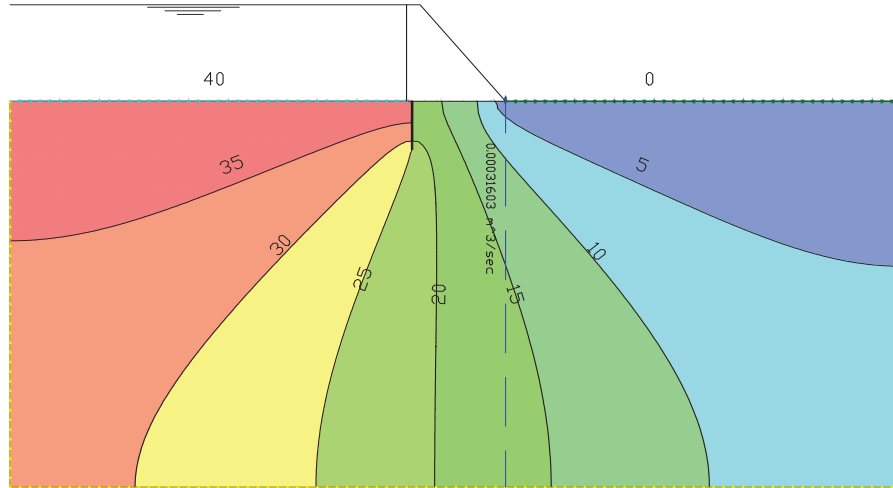


Figura 3.7: Obtenção do caudal no SEEP/W®

Para os resultados relativos ao caudal, estabeleceu-se a seguinte relação:

$$RD(\%) = \frac{Q_i}{Q_{min}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde,

- RD - rácio de descarga
- Q - caudal obtido na secção assinalada na figura 3.7
- i - corresponde a cada relação considerada
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada

A linha com a designação L_j , na figura 3.2, a jusante da barragem, corresponde à linha seleccionada para obter o gradiente. Na figura 3.8 apresenta-se os resultados obtidos para o modelo em análise. Relembra-se que neste caso o eixo das abcissas corresponde ao comprimento total da linha L_j .

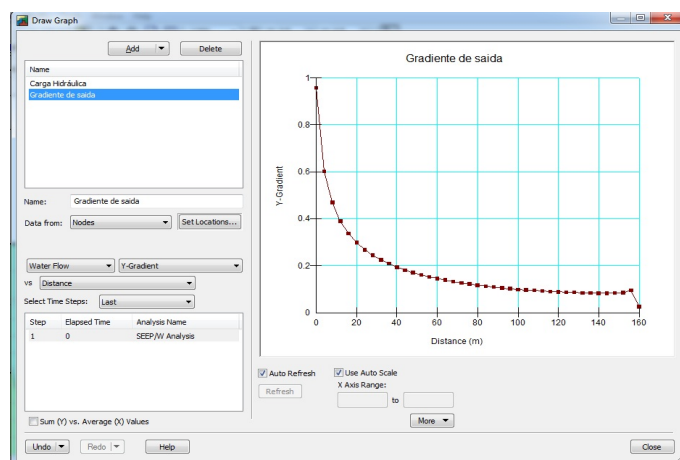


Figura 3.8: Obtenção do gradiente de saída no SEEP/W[®]

Neste caso, para comparação utilizou-se os valores máximos do gradiente de saída. Estes ocorrem imediatamente após o pé da barragem, o que corresponde aos valores iniciais dos gráficos obtidos desta forma.

3.4 Influência da discretização da malha de elementos finitos

Pretende-se verificar se a discretização da malha gerada pelo SEEP/W[®] pode ter influência significativa nos resultados obtidos. Deste modo, geraram-se três malhas para cada modelo base, com diferentes graus de discretização, e analisaram-se os resultados relativos à carga hidráulica, caudal e gradiente de saída. O nível de discretização de cada malha para os dois modelos base pode ser consultado na tabela 3.6. Um exemplo das malhas geradas pode ser observado na figura A.1 do anexo.

Tabela 3.6: Discretização da malha consideradas

Discretização da Malha	Elementos	Nós
Reduzida	3919	4007
Intermédia	7907	8013
Elevada	12813	12935

Para o modelo base 1, modelo com cortina de impermeabilização, os resultados obtidos relativamente à carga hidráulica estão representados na figura 3.9.

3.4 Influência da discretização da malha de elementos finitos

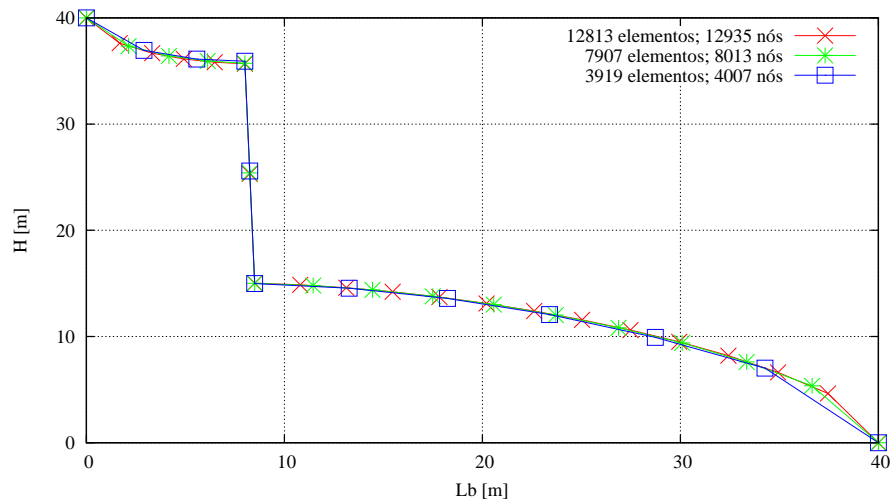


Figura 3.9: Variação da carga hidráulica para as diferentes discretizações consideradas

Verificou-se que, independentemente da discretização da malha, os resultados apresentam um desenvolvimento muito próximo e em alguns locais praticamente coincidentes, pelo que se pode afirmar que, para estes níveis de discretização, não há influência significativa.

Para o mesmo modelo base 1, os resultados obtidos relativos aos caudais podem ser consultados na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Variação do caudal para as diferentes discretizações consideradas do modelo com cortina de impermeabilização

Discretização da malha	Q ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m$)
Reduzida	$3,16 \cdot 10^{-4}$
Intermédia	$3,18 \cdot 10^{-4}$
Elevada	$3,19 \cdot 10^{-4}$

É possível concluir que as diferenças entre o caudal do modelo pouco discretizado para o modelo mais discretizado são pouco relevantes, pelo que se pode afirmar que também não existe influência significativa da discretização do modelo no que respeita ao caudal.

Relativamente ao gradiente de saída, os resultados obtidos estão representados na figura 3.10.

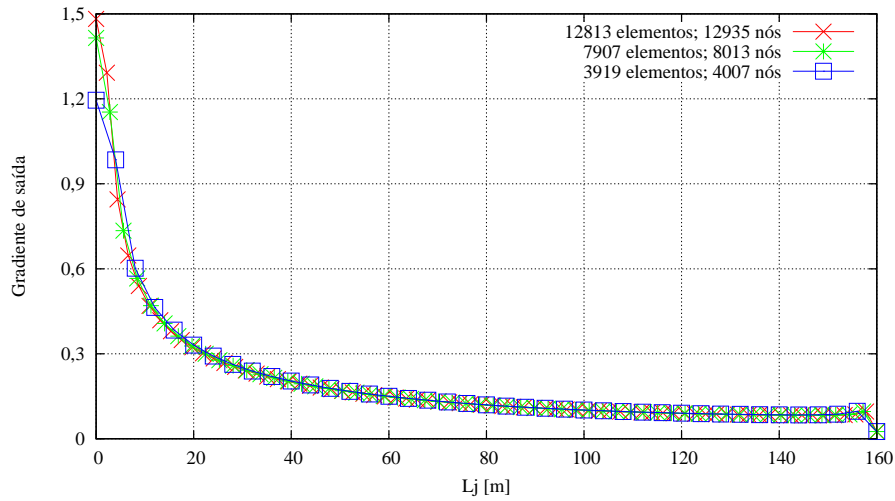


Figura 3.10: Desenvolvimento do gradiente de saída, ao longo de jusante, para as diferentes discretizações consideradas

Independentemente da malha, o desenvolvimento destas curvas é bastante próximo, apresentando diferenças pouco significativas apenas ao início. Conclui-se também que o nível de discretização não traz influência nos resultados relativos ao gradiente de saída.

Para o modelo base 2, modelo com cortina de drenagem, os resultados obtidos relativamente à carga hidráulica estão representados na figura 3.11.

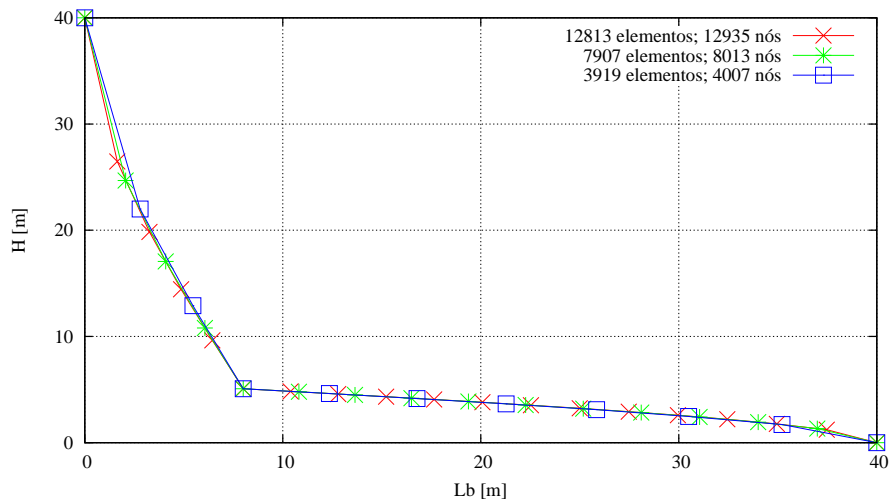


Figura 3.11: Variação da carga hidráulica para diferentes discretizações consideradas do modelo com cortina de drenagem

Tal como acontece com a cortina de impermeabilização, o aumento do grau de discretização

3.4 Influência da discretização da malha de elementos finitos

da malha tem pouca influência no desenvolvimento da carga hidráulica. Verifica-se que os valores obtidos se apresentam bastante próximos para as malhas consideradas.

Relativamente ao caudal, os resultados obtidos são apresentados na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Variação do caudal para as diferentes discretizações consideradas do modelo com cortina de drenagem

Discretização da malha	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m)$
Reduzida	$0,068 \cdot 10^{-6}$
Intermédia	$0,069 \cdot 10^{-6}$
Elevada	$0,071 \cdot 10^{-6}$

Verificou-se que, entre os extremos de discretização adotados, os resultados obtidos relativos ao caudal apresentam uma variação pouco expressiva. Não se atribuiu importância ao nível da discretização de acordo com estes resultados.

Os resultados relativos ao gradiente de saída estão representados na figura 3.12.

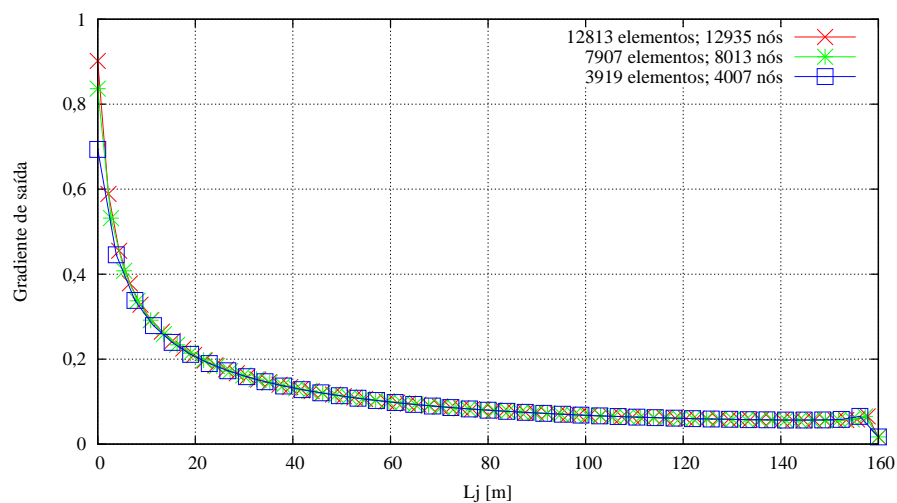


Figura 3.12: Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante, para as diferentes discretizações consideradas

Relativamente ao gradiente, as curvas obtidas apresentam um comportamento bastante próximo, como já se verificou no modelo base 1, pelo que se concluiu que os níveis de discretização adotados não influenciam significativamente os resultados.

Uma vez que a malha não tem influência considerável nos resultados obtidos, optou-se por usar a malha com 3919 elementos correspondente a 4007 nós, ou seja, a que tem menor nível de discretização.

3.5 Comparação com soluções analíticas

3.5.1 Solução de Ijam - Modelo com cortina de impermeabilização

A solução analítica de Ijam (2011) permite a obtenção da carga hidráulica em pontos previamente definidos, como referido na secção 2.4.1. Esta solução analítica foi utilizada para comparar com os resultados obtidos no SEEP/W[®] para o modelo base 1, que corresponde à figura 3.2 a). Para comparar os resultados desta solução com os obtidos no modelo base 1, é necessário determinar o valor da carga hidráulica nos pontos a montante da barragem, imediatamente antes da cortina de impermeabilização, imediatamente após a cortina de impermeabilização e a jusante da barragem, que corresponde aos pontos B, C, E e F, respetivamente, como indicado na figura 2.5.

De acordo com a figura 3.2 a) e fazendo a ligação com a solução analítica descrita em 2.4.1, os valores utilizados para o primeiro modelo base são os seguintes:

- comprimento da base da barragem (b) = 40 metros
- distância desde o paramento de montante até à cortina (b_1) = 8 metros
- comprimento da cortina de impermeabilização (s) = 20 metros
- inclinação da cortina ($\gamma\pi$) = 0,5 radianos (cortina vertical)
- diferença entre os níveis de água a montante e a jusante ($H_1 - H_2$) = 40 metros
- cota do plano onde se pretende calcular o valor da carga hidráulica (y) = 0 metros

Como referido na secção 2.4, t_c toma o valor de -1 e t_e de +1. A determinação dos pontos t_b e t_f é feita recorrendo às equações 2.1 e 2.2. O autor apresenta valores de t_b e t_f para vários comprimentos, inclinações e posições da cortina de impermeabilização. No entanto, como os valores apresentados não coincidem com os necessários, no capítulo 3 foi necessário determiná-los de acordo com as equações apresentadas.

$$-\frac{8}{20} = \left[\frac{(t_b + 1)}{2 - 2 \cdot 0,5} \right]^{1-0,5} \cdot \left[\frac{(t_b - 1)}{2 \cdot 0,5} \right]^{0,5} \rightarrow t_b = -1,09$$

$$\frac{40 - 8}{20} = \left[\frac{(t_f + 1)}{2 - 2 \cdot 0,5} \right]^{1-0,5} \cdot \left[\frac{(t_f - 1)}{2 \cdot 0,5} \right]^{0,5} \rightarrow t_f = 1,89$$

O valor da carga hidráulica nos pontos referidos faz-se através da equação 2.3.

3.5 Comparação com soluções analíticas

Assim,

$$H_B = 40 + 0 - \frac{40}{2} - \frac{40}{\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{2 \cdot (-1,09) - (-1,09) - 1,89}{1,89 - (-1,09)} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow H_B = 40 \quad m$$

$$H_C = 40 + 0 - \frac{40}{2} - \frac{40}{\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{2 \cdot (-1) - (-1,09) - 1,89}{1,89 - (-1,09)} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow H_C = 35,55 \quad m$$

$$H_E = 40 + 0 - \frac{40}{2} - \frac{40}{\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{2 \cdot (1) - (-1,09) - 1,89}{1,89 - (-1,09)} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow H_E = 14,72 \quad m$$

$$H_F = 40 + 0 - \frac{40}{2} - \frac{40}{\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{2 \cdot (1,89) - (-1,09) - 1,89}{1,89 - (-1,09)} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow H_F = 0 \quad m$$

Os resultados obtidos da solução analítica e do SEEP/W[®] encontram-se representados na tabela 3.9 e na figura 3.13.

Tabela 3.9: Comparação dos resultados obtidos com a solução analítica de Ijam (2011)

Pontos	B	C	E	F
Solução analítica	40	35,55	14,72	0
SEEP/W [®]	40	37,11	17,61	0

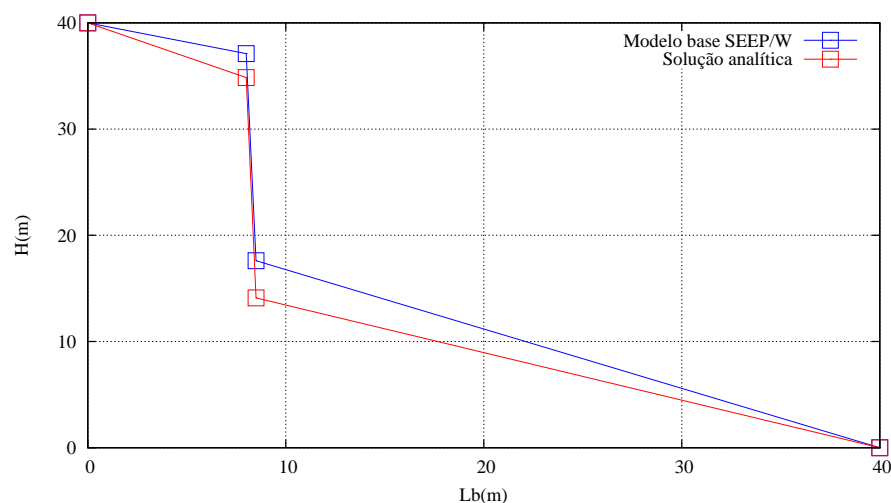


Figura 3.13: Comparação da carga hidráulica com solução analítica de Ijam (2011)

A análise dos resultados da figura 3.13 permite constatar o seguinte:

- A solução analítica apresenta uma boa aproximação com o desenvolvimento da carga hidráulica obtido no SEEP/W[®].
- Refere-se que a solução analítica de Ijam (2011) apenas permite a obtenção dos pontos definidos, neste caso 4 (um ponto a montante, um antes e imediatamente após a cortina e um ponto a jusante). Estes pontos são unidos por retas uma vez que não se conhece o desenvolvimento da carga hidráulica entre os mesmos. Dos valores obtidos no SEEP/W[®], retira-se apenas aqueles que coincidem com os da solução analítica, de modo a que estes possam também ser unidos por retas e apresentar um desenvolvimento semelhante.

3.5.2 Solução de Andrade - Modelo com cortina de drenagem

A solução analítica de Andrade (1982) difere da solução analítica de Ijam (2011) na medida em que não permite obter diretamente o desenvolvimento do diagrama de carga hidráulica na base da barragem mas, partindo da determinação da carga hidráulica na linha de drenos, é possível obter os valores dos caudais de montante, jusante e o caudal que flui para os drenos. Esta solução analítica foi utilizada para comparar com os resultados obtidos no modelo base 2, que corresponde à figura 3.2 b).

De acordo com a figura 3.2 b) e fazendo a ligação com a solução analítica descrita em 2.4.2, os valores utilizados para o segundo modelo base são os seguintes:

3.5 Comparação com soluções analíticas

- comprimento da base da barragem (c) = 40 metros
- carga hidráulica na cortina de drenagem (H_d) = 5,08 metros
- distância da cortina ao paramento de montante (d) = 8 metros
- distância da cortina ao paramento de jusante (b) = 32 metros
- espaçamento entre drenos (a) = 3 metros

Na solução analítica de Andrade (1982), começa-se por determinar o valor do fator de forma dos drenos utilizando a equação 2.9 descrita em 2.4.2 e que toma o valor de 0,8275. De seguida é necessário determinar o valor médio da carga hidráulica na zona de localização da linha de drenos. Como já calculado em 3.2.4, toma o valor de 5,08 metros. Lembra-se também que o coeficiente de permeabilidade do maciço de fundação é de $10^{-5} m \cdot s^{-1}$. Após a determinação do valor da carga hidráulica na linha drenos é necessário determinar o valor dos caudais de montante, do que é escoado pelos drenos e do de jusante através das equações 2.5, 2.6 e 2.7 respetivamente.

Os valores dos caudais referidos, obtidos através da solução analítica de Andrade (1982), são os seguintes:

$$q_{montante} = 10^{-5} \cdot \frac{40 - 5,08}{8} \cdot 3 \rightarrow q_{montante} = 1,31 \cdot 10^{-4} \quad m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$$

$$q_{dreno} = 10^{-5} \cdot 0,8275 \cdot (5,08 - 0) \cdot 3 \rightarrow q_{dreno} = 1,26 \cdot 10^{-4} \quad m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$$

$$q_{jusante} = 10^{-5} \cdot \frac{5,08 - 0}{32} \cdot 3 \rightarrow q_{jusante} = 0,048 \cdot 10^{-4} \quad m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$$

Os resultados obtidos no SEEP/W[®], utilizando o segundo modelo base e os valores da solução analítica, encontram-se representados na tabela 3.10.

Tabela 3.10: Resultados obtidos e comparação com a solução analítica de Andrade (1982)

	H_d	$q_{montante}$	q_{dreno}	$q_{jusante}$
		$\cdot 10^{-4} (m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$		
Solução Analítica		1,31	1,26	0,048
SEEP/W [®]	5,08	1,78	1,71	0,068

A análise dos resultados da tabela 3.10 permite constatar que os valores obtidos para os caudais através do SEEP/W[®] são bastante semelhante aos obtidos através da solução analítica. Confirma-se assim, que o programa encontra-se em concordância com a solução analítica de Andrade (1982).

Capítulo 4

Análise Paramétrica: Modelo com cortina de impermeabilização

4.1 Introdução

Os cálculos realizados no capítulo 3 serviram para comprovar que os resultados obtidos no programa de cálculo automático reproduzem de forma apropriada as duas soluções analíticas propostas por Ijam (2011) e Andrade (1982), quando se utiliza cortinas de impermeabilização ou de drenagem, respectivamente. No presente capítulo realizou-se uma análise paramétrica utilizando um modelo com cortina de impermeabilização. Nesta análise realizaram-se alterações ao comprimento, localização, inclinação e permeabilidade do material que constitui a cortina de impermeabilização, analisando a influência destes parâmetros no desenvolvimento da carga hidráulica, caudal e do gradiente de saída, obtidos como explicado na secção 3.3.2 do capítulo 3. Realizou-se ainda um estudo comparativo com autores que estudaram a influência do comprimento, inclinação e localização da cortina.

Na figura 4.1 apresenta-se o modelo utilizado para o estudo paramétrico. Este modelo foi definido com as mesmas propriedades do modelo utilizado no capítulo 3, com as designações das tabelas 3.2 e 3.4. Assim, o solo de fundação possui um comprimento a montante, um comprimento a jusante e uma profundidade de 160 metros ($L_m = L_j = L_q = 4 \cdot Lb = 160 \text{ m}$), uma altura de água a montante de 40 metros e sem água a jusante. O comprimento da base da barragem é de 40 metros. O coeficiente de permeabilidade do solo de fundação é de $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

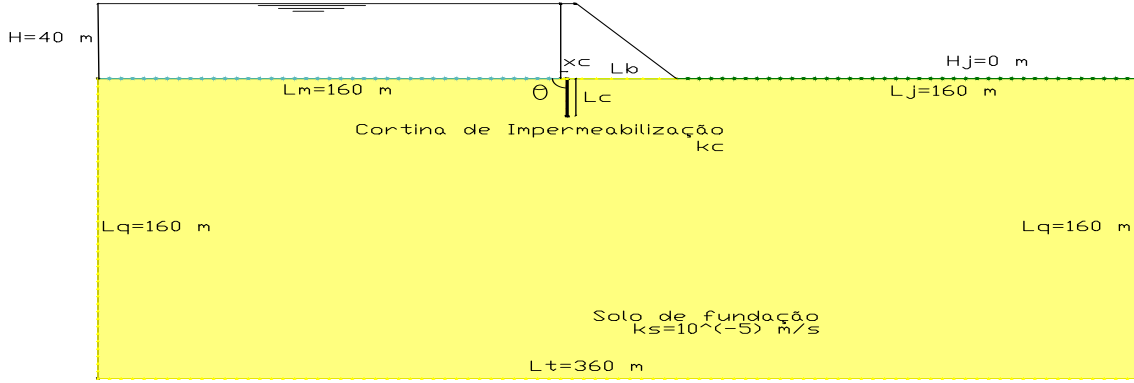


Figura 4.1: Definição do modelo utilizado

Na tabela 4.1, definiu-se, para cada análise realizada, os parâmetros que se mantiveram e os que foram alterados. Para estes últimos, apresenta-se ainda as variações que foram realizadas, de forma adimensional.

Na primeira análise efetuada sobre a influência do comprimento da cortina, manteve-se esta na vertical ($\theta = 90^\circ$), a 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b=0,2$) e com um coeficiente de permeabilidade de $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$). As alterações no comprimento da cortina, relativamente ao comprimento da base da barragem, correspondem a 8, 16, 20, 32 e 64 metros.

Na segunda análise sobre a influência da inclinação da cortina, manteve-se esta com 20 metros de comprimento ($L_c/L_b=0,5$), a 8 metros do paramento ($x_c/L_b=0,2$) e com um coeficiente de permeabilidade de $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$). As alterações na inclinação da cortina correspondem a inclinações de 30° , 60° , 90° , 120° e 150° .

Na terceira análise sobre influência da localização da cortina, esta manteve-se com 20 metros de comprimento ($L_c/L_b=0,5$), na vertical ($\theta = 90^\circ$) e com um coeficiente de permeabilidade de $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$). As alterações na localização da cortina, relativamente ao comprimento da base da barragem, correspondem à sua colocação a 8, 16, 24 e 32 metros, desde o paramento de montante.

Na última análise sobre a influência da permeabilidade da cortina, esta manteve-se com 20 metros de comprimento ($L_c/L_b=0,5$), na vertical ($\theta = 90^\circ$) e a 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b=0,2$). Realizou-se alterações no coeficiente de permeabilidade da cortina, relativamente ao coeficiente de permeabilidade do maciço de fundação, que correspondem a 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} e $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

Tabela 4.1: Relações e valores utilizados no estudo paramétrico com cortina de impermeabilização

Parâmetros inalterados	Parâmetros alterados	Variações analisadas
Ângulo($\theta = 90^\circ$)	Comprimento	$L_c/L_b=0,2$
Localização($x_c/L_b = 0,2$)		$L_c/L_b=0,4$
Permeabilidade($k_c/k_s=0,001$)		$L_c/L_b=0,5$
		$L_c/L_b=0,8$
		$L_c/L_b=1,6$
Comprimento($L_c/L_b=0,5$)	Ângulo	$\theta = 30^\circ$
Localização($x_c/L_b=0,2$)		$\theta = 60^\circ$
Permeabilidade($k_c/k_s=0,001$)		$\theta = 90^\circ$
		$\theta = 120^\circ$
		$\theta = 150^\circ$
Comprimento($L_c/L_b=0,5$)	Localização	$x_c/L_b=0,2$
Ângulo($\theta = 90^\circ$)		$x_c/L_b=0,4$
Permeabilidade($k_c/k_s=0,001$)		$x_c/L_b=0,6$
		$x_c/L_b=0,8$
Comprimento($L_c/L_b=0,5$)	Permeabilidade	$k_c/k_s=0,1$
Ângulo($\theta = 90^\circ$)		$k_c/k_s=0,01$
Localização($x_c/L_b=0,2$)		$k_c/k_s=0,001$
		$k_c/k_s=0,0001$

4.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

Pretende-se verificar até que ponto o aumento do comprimento da cortina de impermeabilização produz efeitos significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 4.1, a cortina permanece na posição vertical ($\theta = 90^\circ$) e dista 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b = 0,2$). O coeficiente de permeabilidade da cortina é de $10^{-8} m \cdot s^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$).

Na figura 4.2 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação para a cortina de menor ($L_c/L_b = 0,2$) e maior comprimento ($L_c/L_b = 1,6$).

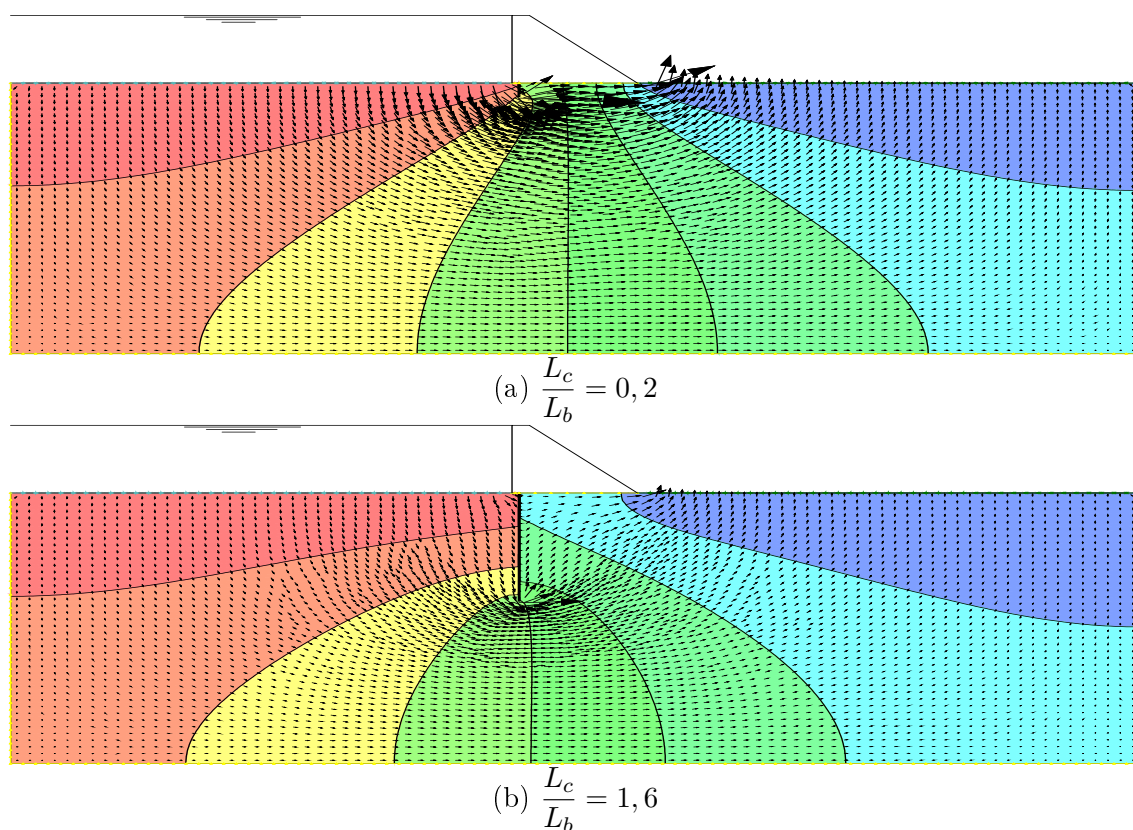


Figura 4.2: Caudal e linhas equipotenciais obtidos com a variação do comprimento da cortina

É possível observar que o aumento do comprimento obriga a que mais linhas equipotenciais contornem a cortina relativamente à cortina de menor comprimento.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.3 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, com o aumento do comprimento da cortina de impermeabilização.

4.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

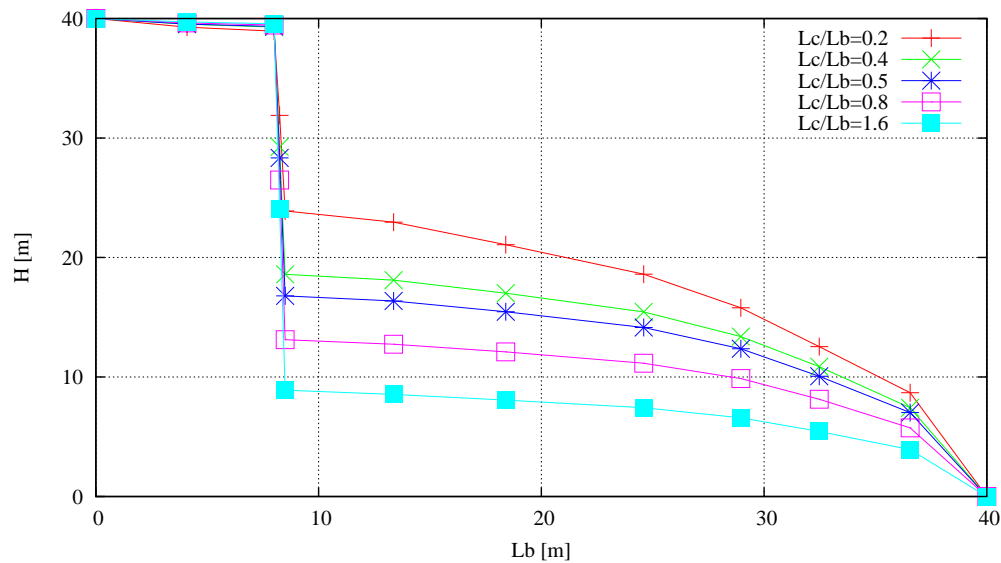


Figura 4.3: Variação da carga hidráulica com o aumento do comprimento da cortina

Pela figura 4.3, verifica-se que quanto maior for o comprimento da cortina de impermeabilização maior será a redução da carga hidráulica na zona onde esta se localiza.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 4.2 os valores obtidos para cada comprimento considerado.

Tabela 4.2: Variação do caudal com o aumento do comprimento da cortina

Lc/Lb	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
0,2	$3,53 \cdot 10^{-4}$
0,4	$3,28 \cdot 10^{-4}$
0,5	$3,16 \cdot 10^{-4}$
0,8	$2,85 \cdot 10^{-4}$
1,6	$2,26 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se que existe uma diminuição do caudal com o aumento do comprimento da cortina de impermeabilização. Esta diminuição está relacionada com o fato de o aumento do comprimento diminuir a zona de passagem da água e aumentar o percurso realizado pela água para contornar a cortina, o que consequentemente diminui a quantidade de água que atinge o lado jusante.

Na figura 4.4 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as diferentes relações de comprimento consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.1 do anexo, foram calculados segundo a equação 3.1. Na

mesma figura apresenta-se os resultados da variação do rácio de descarga (RD) para as diferentes relações de comprimento consideradas. Estes valores foram calculados segundo a equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- i - corresponde a cada relação considerada, neste caso $\frac{L_c}{L_b} = 0,2, 0,4, 0,5, 0,8$ e $1,6$
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\frac{L_c}{L_b} = 0,2$

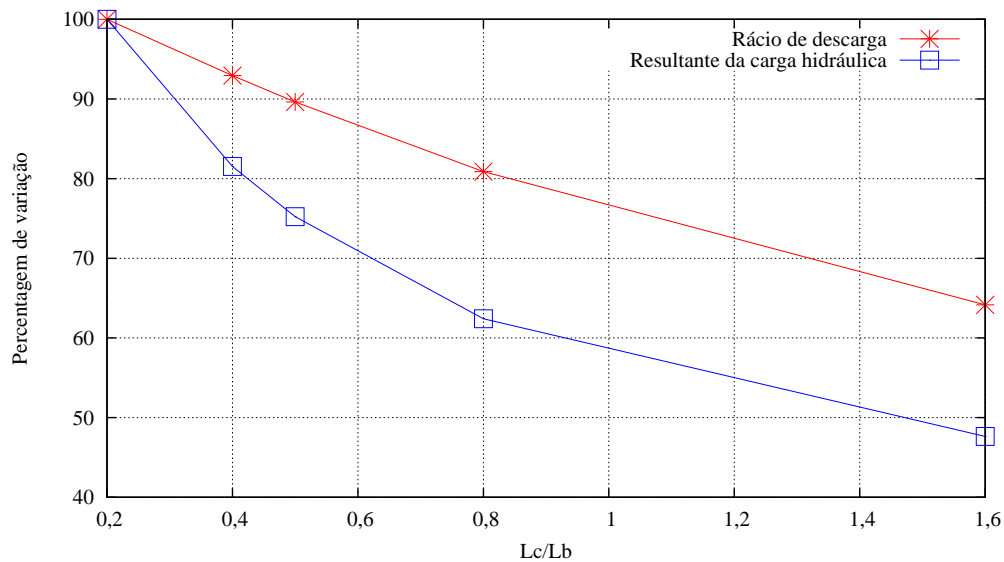


Figura 4.4: Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com o aumento do comprimento da cortina

Na figura 4.4 verifica-se que o aumento do comprimento da cortina diminui em cerca de 50% a resultante da carga hidráulica entre os comprimentos mínimo e máximo adotados. Pela mesma figura verifica-se também que o declive da reta quando se altera o comprimento da cortina de impermeabilização de $L_c/L_b=0,2$ para $L_c/L_b=0,4$ é superior aos declives dos outros troços que tendem para um patamar, a partir do qual o aumento do comprimento da cortina de impermeabilização deixa de produzir resultados assinaláveis. Observou-se ainda que a alteração do comprimento da cortina de $L_c/L_b = 0,2$ para $L_c/L_b = 1,6$ provocou uma redução do caudal de cerca de 35%.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se na figura 4.5, o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante da barragem até ao fim do modelo considerado.

4.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

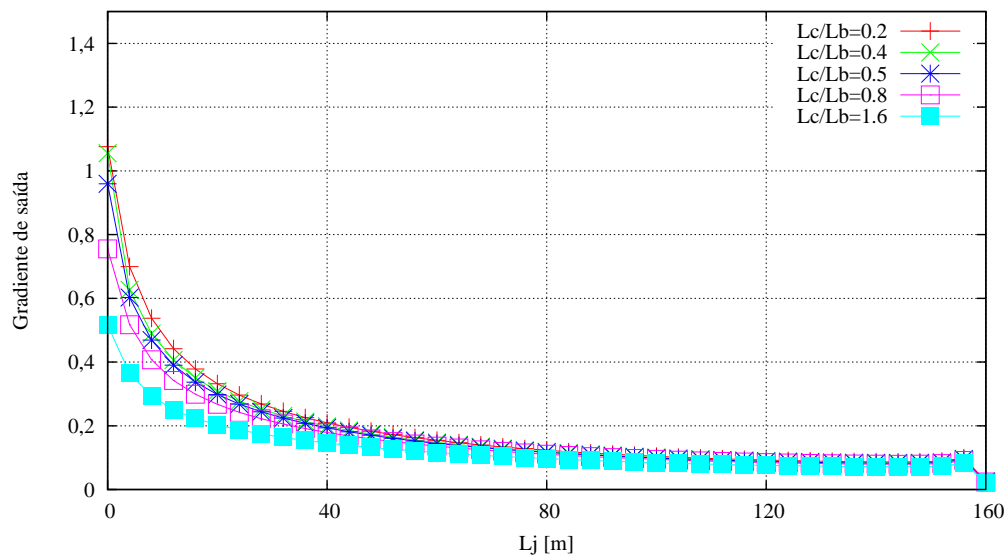


Figura 4.5: Desenvolvimento do gradiente saída ao longo de jusante

Na figura 4.6 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada comprimento considerado. Os valores encontram-se na tabela A.2 do anexo.

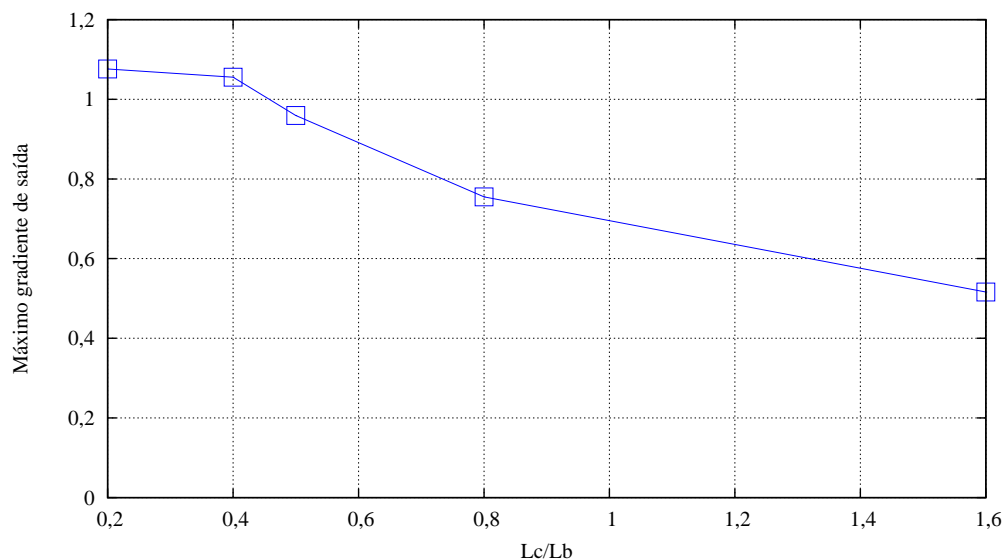


Figura 4.6: Valores dos gradientes de saída máximo com o aumento do comprimento da cortina

Na figura 4.6 é possível inferir que a partir de $L_c/L_b = 0,4$ existe um decréscimo bastante acentuado do gradiente de saída, apesar de no início não se verificar diferenças assinaláveis. Verificou-se ainda uma redução do gradiente de saída em cerca de 50% entre os

comprimentos mínimo e máximo utilizados.

4.3 Estudo da influência da inclinação da cortina

Pretende-se verificar qual a inclinação da cortina que produz efeitos mais significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 4.1, a cortina manteve o seu comprimento 20 metros ($L_c/L_b = 0,5$) e dista 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b = 0,2$). O coeficiente de permeabilidade da cortina é de $10^{-8} m \cdot s^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$).

Na figura 4.7 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação para a cortina mais inclinada a montante e para a cortina mais inclinada a jusante.

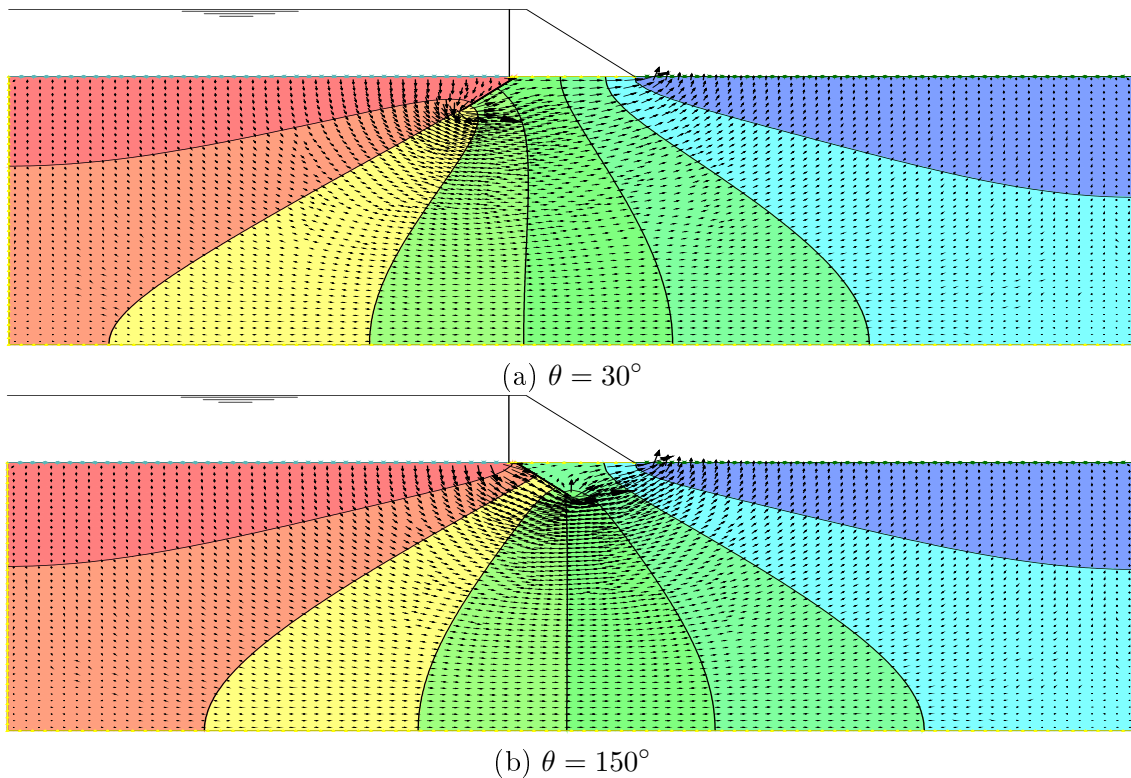


Figura 4.7: Caudal e linhas equipotenciais com a variação da inclinação da cortina

Na figura 4.7 é possível observar que independentemente da orientação da cortina de impermeabilização, não se verifica alterações das linhas equipotenciais na base da barragem.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.8 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, para as diferentes inclinações adotadas.

4.3 Estudo da influência da inclinação da cortina

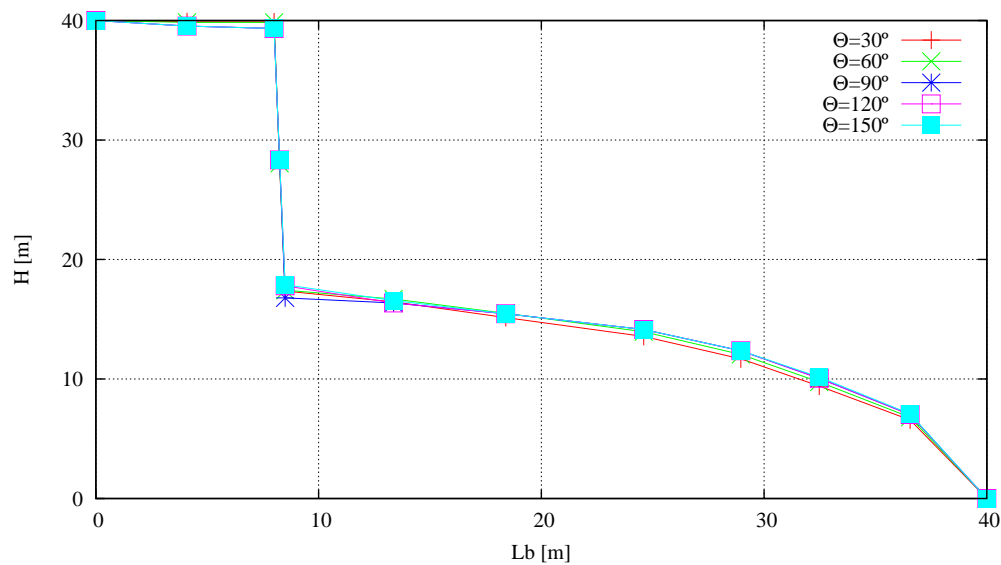


Figura 4.8: Variação da carga hidráulica com a inclinação da cortina de impermeabilização

Como se pode observar a inclinação da cortina não produz efeitos significativos na variação da carga hidráulica, comprovado pelo fato de as curvas obtidas encontrarem-se sempre sobrepostas. Uma das razões pode estar relacionada com o comprimento da cortina, igual a 20 metros ($L_c/L_b = 0,5$), que pode não ser suficientemente comprido para produzir resultados mais expressivos.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 4.3 os valores obtidos, para cada inclinação considerada.

Tabela 4.3: Variação do caudal com a inclinação da cortina de impermeabilização

θ	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
30°	$2,93 \cdot 10^{-4}$
60°	$3,03 \cdot 10^{-4}$
90°	$3,16 \cdot 10^{-4}$
120°	$3,23 \cdot 10^{-4}$
150°	$3,25 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se que existe um aumento do caudal quando a cortina se inclina para jusante, embora não muito expressivo.

Na figura 4.9 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as diferentes inclinações consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.3 do anexo, foram calculados segundo a equação 3.1. Na mesma

figura apresenta-se a variação do rácio de descarga (RD) para as diferentes inclinações consideradas. Estes valores foram calculados segundo a equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- i - corresponde a cada relação considerada, neste caso $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$.
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\theta = 30^\circ$.

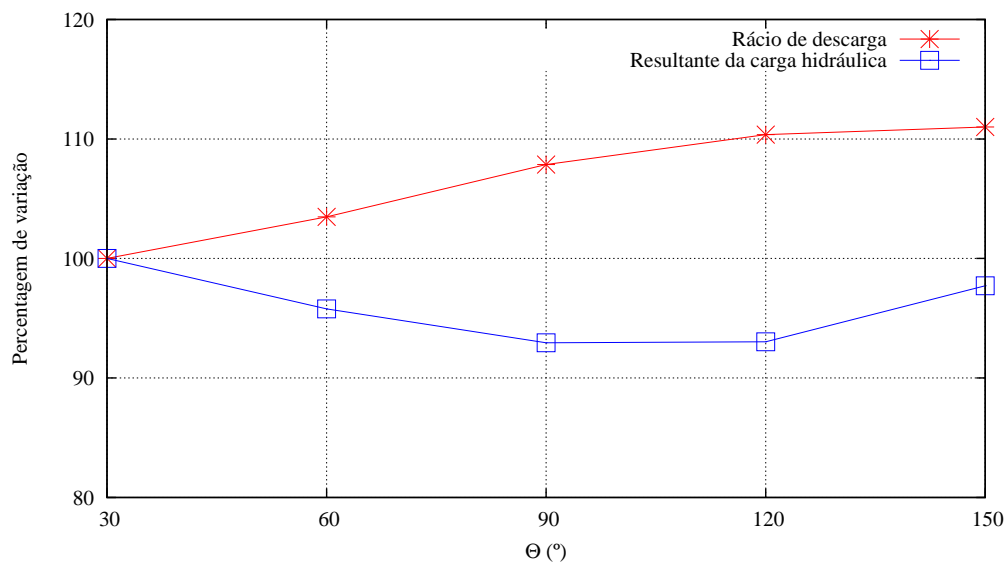


Figura 4.9: Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a inclinação da cortina

Verifica-se, em primeiro lugar, que os declives das curvas obtidas são pouco acentuados. As variações obtidas foram inferiores a 10%. É de salientar que o valor mínimo para a resultante da carga hidráulica acontece quando esta se encontra na posição vertical ($\theta = 90^\circ$). Verifica-se o que foi dito relativamente aos valores do caudal obtidos, ou seja, existe um aumento quando a cortina se inclina para jusante. Apesar do aumento (cerca de 10%), verifica-se que este tende para um patamar uma vez que o último troço da curva obtida traduz-se numa linha horizontal.

Relativamente ao gradiente saída, apresenta-se na figura 4.10, o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante da barragem até ao fim do modelo.

4.3 Estudo da influência da inclinação da cortina

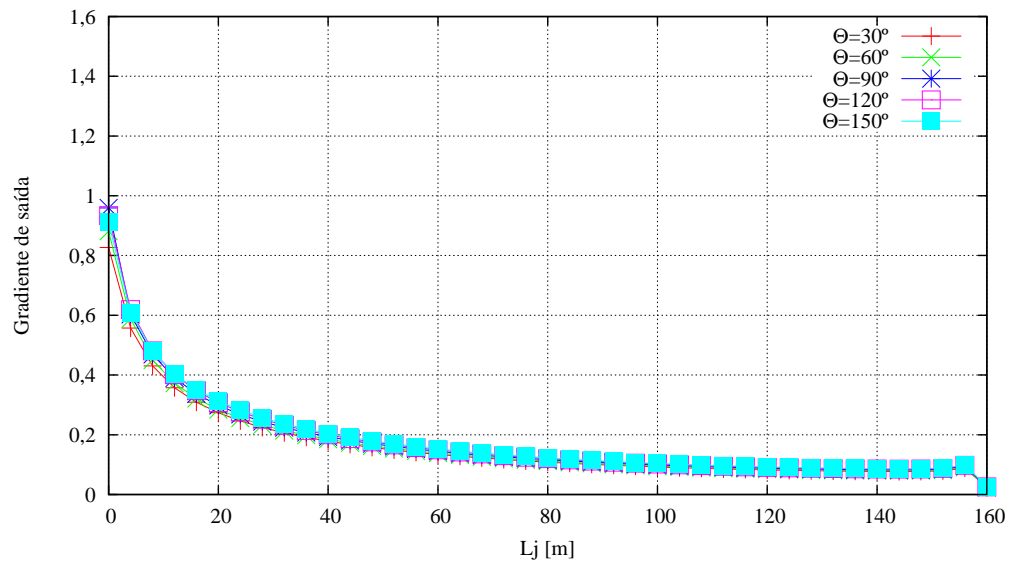


Figura 4.10: Desenvolvimento do gradiente saída ao longo de jusante

Na figura 4.11 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada inclinação considerada. Os valores encontram-se na tabela A.4 do anexo.

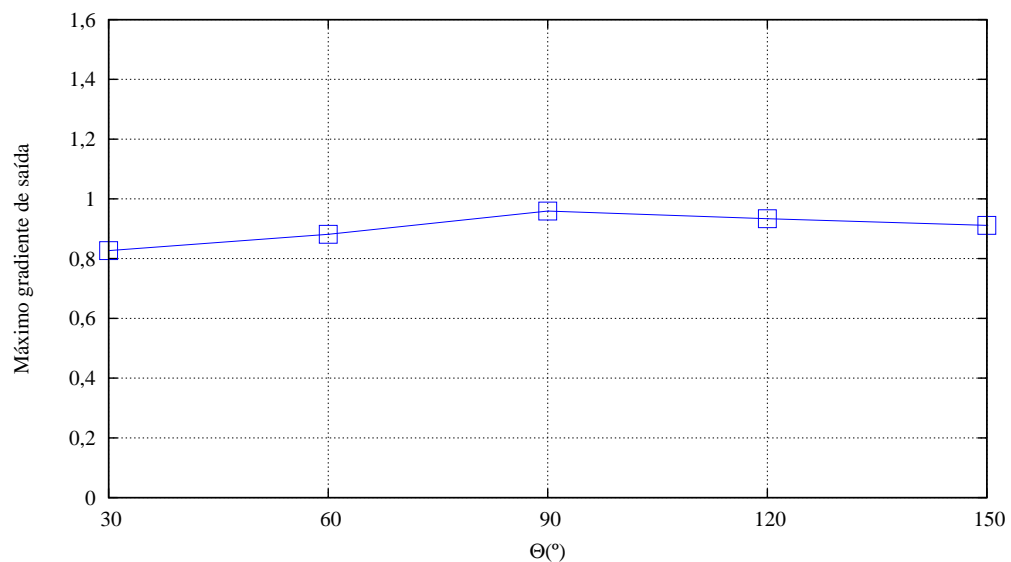


Figura 4.11: Valores do gradiente de saída máximo com a inclinação da cortina

Observa-se que as variações existentes são pouco acentuadas (a reta obtida é praticamente horizontal). Verificou-se que o valor máximo ocorre quando a cortina se encontra na posição vertical ($\theta = 90^\circ$).

4.4 Estudo da influência da localização da cortina

Pretende-se verificar qual a localização da cortina que produz efeitos mais significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 4.1, a cortina permanece na posição vertical ($\theta = 90^\circ$) e com comprimento igual a 20 metros ($L_c/L_b = 0,5$). O coeficiente de permeabilidade da cortina é de $10^{-8} m \cdot s^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$).

Na figura 4.12 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação para a cortina localizada mais a montante e para a cortina localizada mais a jusante.

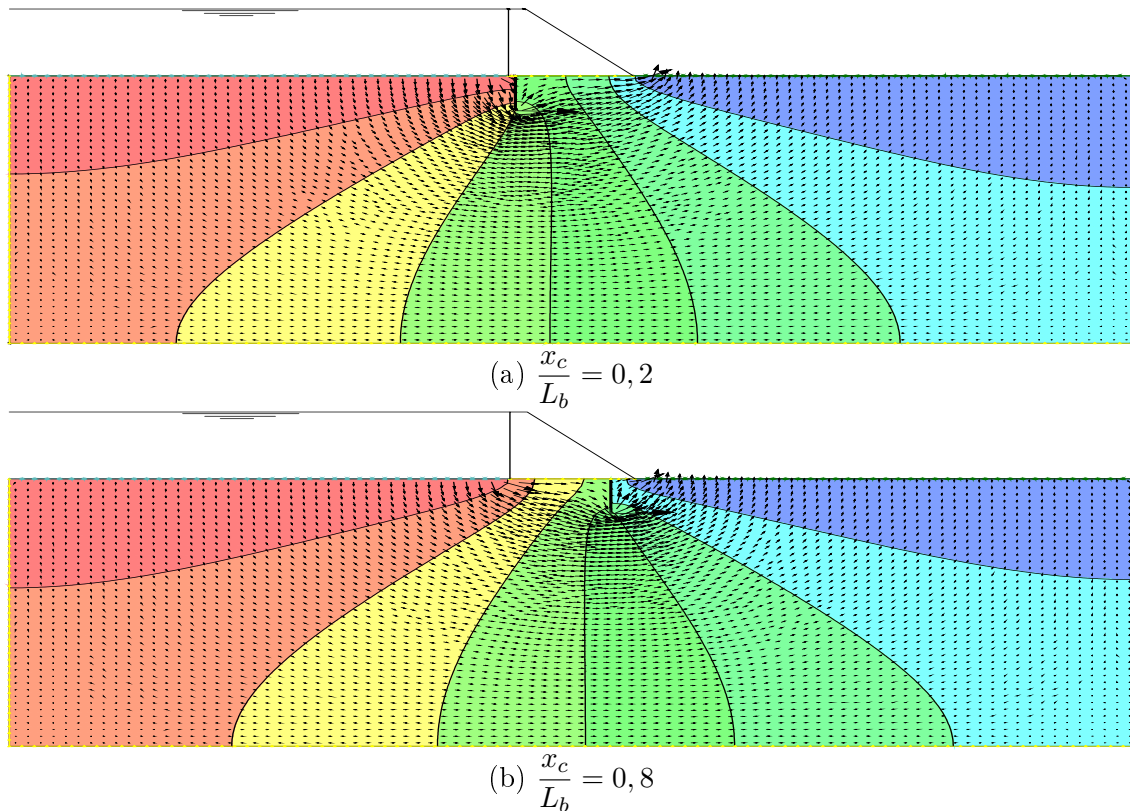


Figura 4.12: Caudal e linhas equipotenciais com a variação da localização da cortina

De acordo com a figura 4.12, é possível observar que à medida que a cortina se posiciona mais para jusante, as linhas equipotenciais de montante acompanham o seu movimento ficando assim sob a base da barragem.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.13 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, para as diferentes posições consideradas.

4.4 Estudo da influência da localização da cortina

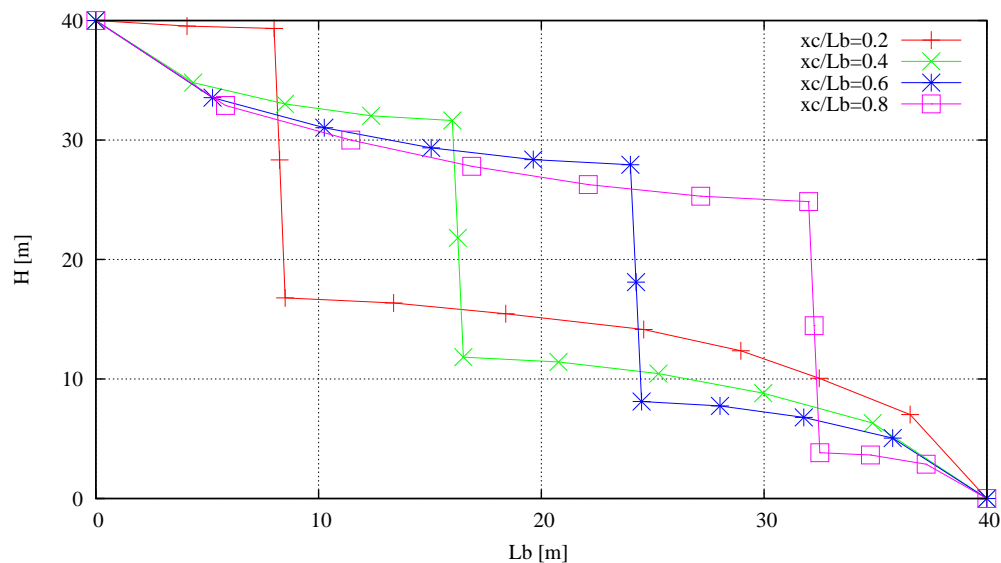


Figura 4.13: Variação da carga hidráulica com a localização cortina

Verifica-se as reduções mais significativas ocorrem na zona onde se localiza a cortina, apresentando variações pouco apreciáveis até essa mesma zona.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 4.4 os valores obtidos, para cada localização considerada.

Tabela 4.4: Variação do caudal com a localização da cortina de impermeabilização

x_c/L_b	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
0,2	$3,16 \cdot 10^{-4}$
0,4	$3,28 \cdot 10^{-4}$
0,6	$3,29 \cdot 10^{-4}$
0,8	$3,24 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se que existe um aumento do caudal até à posição $x_c/L_b=0,6$, embora pouco relevante, uma vez que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza.

Na figura 4.14 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as várias posições consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.5 do anexo, foram calculados utilizando a equação 3.1. Na mesma figura apresenta-se os resultados da variação do rácio de descarga (RD) para as diferentes localizações consideradas. Estes valores foram calculados através da equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- i - corresponde a cada relação considerada, neste caso $\frac{x_c}{L_b} = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$.
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\frac{x_c}{L_b} = 0,2$

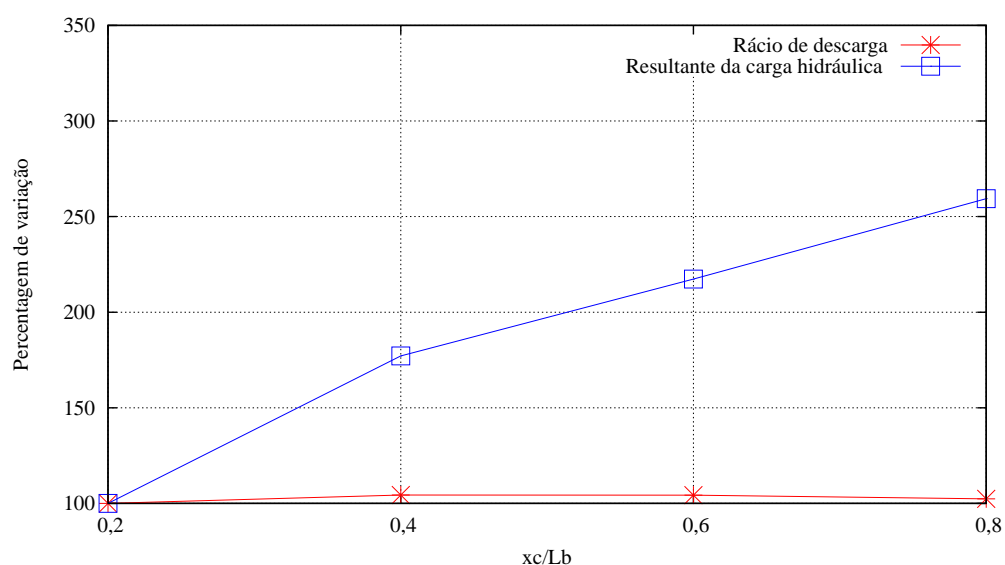


Figura 4.14: Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a localização da cortina

Na figura 4.14, é possível observar que o valor máximo da resultante da carga hidráulica acontece quando a cortina de impermeabilização se localiza no fim da barragem. Este aumento é progressivo à medida que a cortina se desloca para jusante. Verifica-se que a localização da cortina não traz efeitos assinaláveis ao rácio de descarga uma vez que a linha obtida é praticamente horizontal. Apesar de existir um aumento, este é desprezável uma vez que é ínfimo (inferior a 5%) quando comparado com o aumento da resultante da carga hidráulica (cerca de 170%).

Relativamente ao gradiente saída, apresenta-se na figura 4.15 o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante da barragem até ao fim do modelo.

4.4 Estudo da influência da localização da cortina

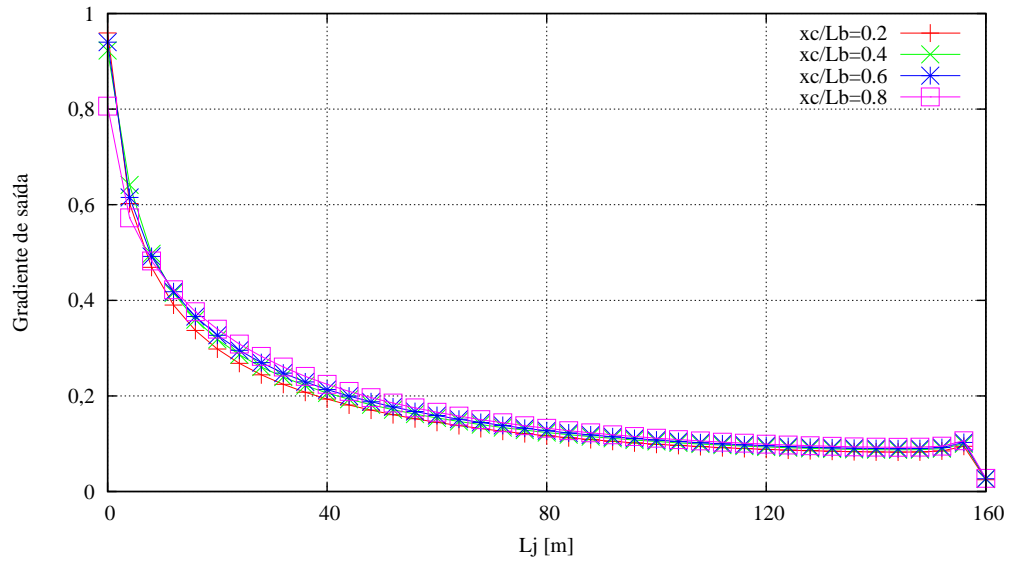


Figura 4.15: Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante

Na figura 4.16 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada posição considerada. Os valores encontram-se na tabela A.6 do anexo.

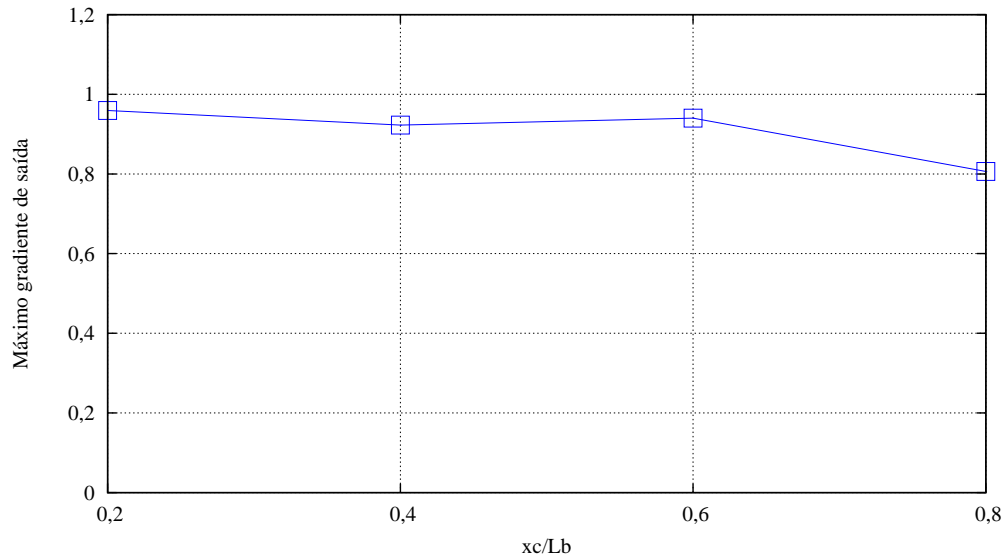


Figura 4.16: Valores do gradiente de saída máximo com a localização da cortina

Os resultados obtidos mostram que não existem diferenças significativas, uma vez que a linha obtida é praticamente horizontal. Verificou-se que o valor mínimo acontece quando $x_c/L_b = 0,8$, ou seja, com a cortina localizada a jusante.

4.5 Estudo da influência da permeabilidade

Pretende-se verificar até que ponto a alteração da permeabilidade da cortina produz efeitos significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 4.1, a cortina permanece com comprimento igual a 20 metros ($L_c/L_b = 0,5$), na posição vertical ($\theta = 90^\circ$) e dista 8 metros do paramento de montante ($L_c/L_b = 0,2$).

Na figura 4.17 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação obtidas para a cortina mais permeável e menos permeável.

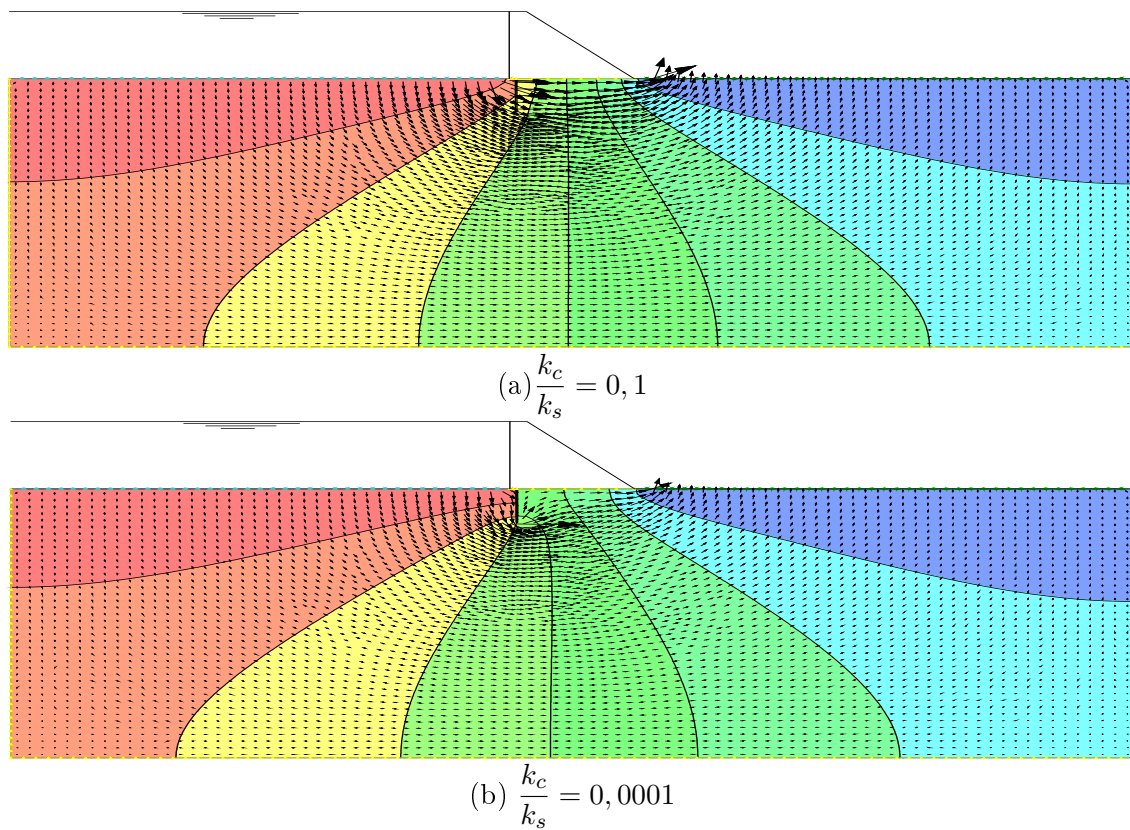


Figura 4.17: Caudal e linhas equipotenciais com a variação da permeabilidade da cortina de impermeabilização

Na figura 4.17 é possível inferir que com o aumento da permeabilidade da cortina o caudal que a atravessa diminui, sendo portanto obrigado a contornar a mesma. Além desta diminuição, verifica-se na base da barragem que as zonas delimitadas pelas linhas equipotenciais sofrem ligeiras alterações.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.18 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, com a variação da permeabilidade da cortina.

4.5 Estudo da influência da permeabilidade

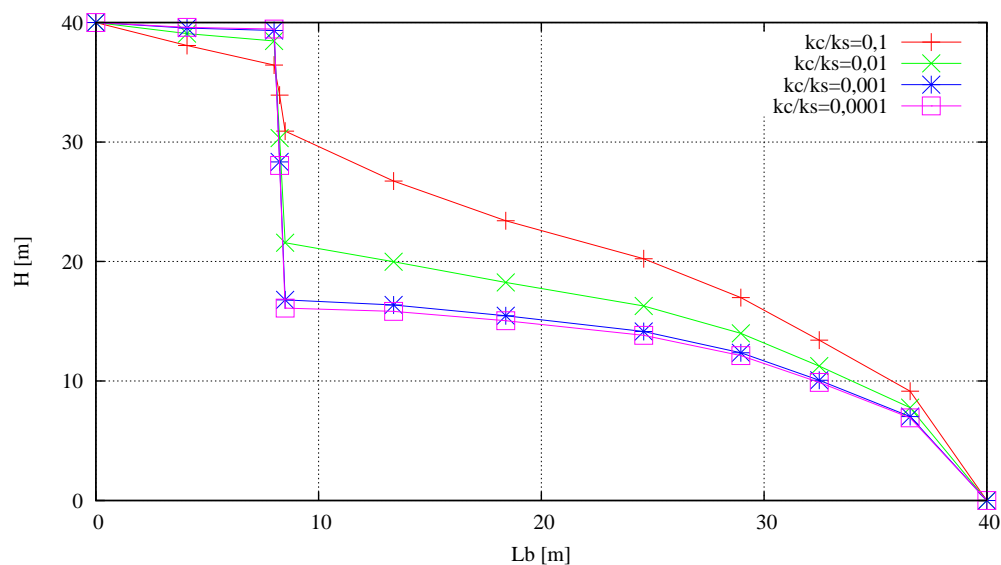


Figura 4.18: Variação da carga hidráulica com a variação do coeficiente de permeabilidade da cortina

É possível observar que quanto menos permeável for a cortina, menor será o valor da carga hidráulica na zona onde esta se localiza. Verificou-se também que a última alteração no valor do coeficiente de permeabilidade não produz diferenças significativas.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 4.5 os valores obtidos, para cada relação de permeabilidade considerada.

Tabela 4.5: Variação do caudal com a alteração do coeficiente de permeabilidade da cortina

$\frac{k_c}{k_s}$	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
0,1	$3,65 \cdot 10^{-4}$
0,01	$3,33 \cdot 10^{-4}$
0,001	$3,16 \cdot 10^{-4}$
0,0001	$3,14 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se uma diminuição do valor do caudal com o aumento da permeabilidade da cortina. De $k_c/k_s = 0,001$ para $k_c/k_s = 0,0001$ não existem diferenças consideráveis.

Na figura 4.19 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as várias relações de permeabilidade consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.7 do anexo, foram calculados utilizando a equação 3.1. Na mesma figura apresenta-se os resultados da variação do rácio de descarga (RD) para as

diferentes relações de permeabilidade consideradas. Estes valores foram calculados através da equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- i- corresponde a cada relação considerada, neste caso $\frac{k_c}{k_s} = 0,1, 0,01, 0,001, 0,0001$
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\frac{k_c}{k_s} = 0,1$

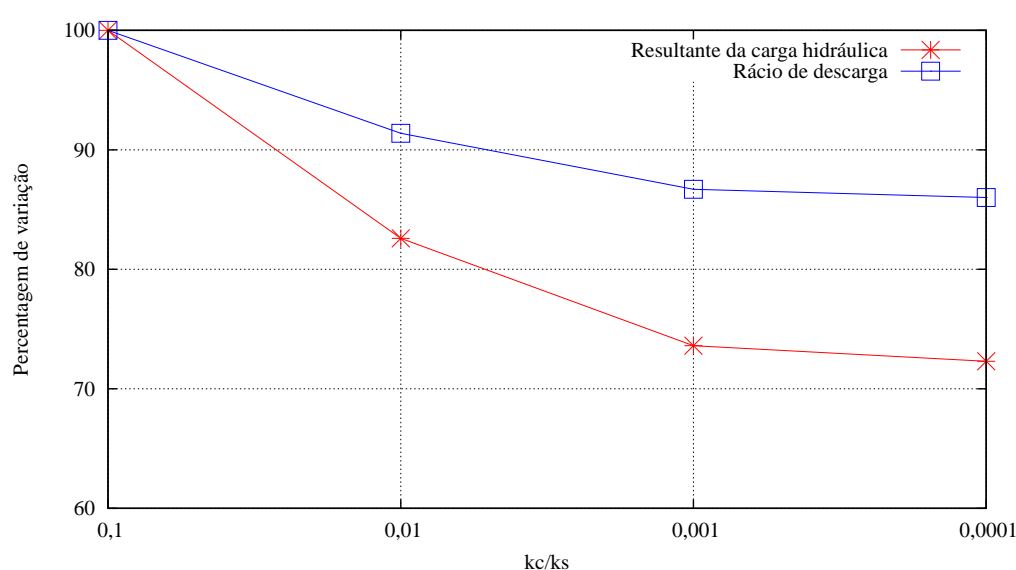


Figura 4.19: Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a variação do coeficiente de permeabilidade da cortina

A figura 4.19 permite afirmar que a alteração da relação da permeabilidade de $k_c/k_s = 0,1$ para $k_c/k_s = 0,01$ traduz a diferença mais expressiva, quer para a resultante da carga hidráulica quer para o rácio de descarga, como se pode verificar pelo declive do troço. A partir de $k_c/k_s = 0,001$ não existem diferenças significativas como se pode concluir pela reta horizontal obtida a partir deste ponto

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.20, o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante até ao fim do modelo.

4.5 Estudo da influência da permeabilidade

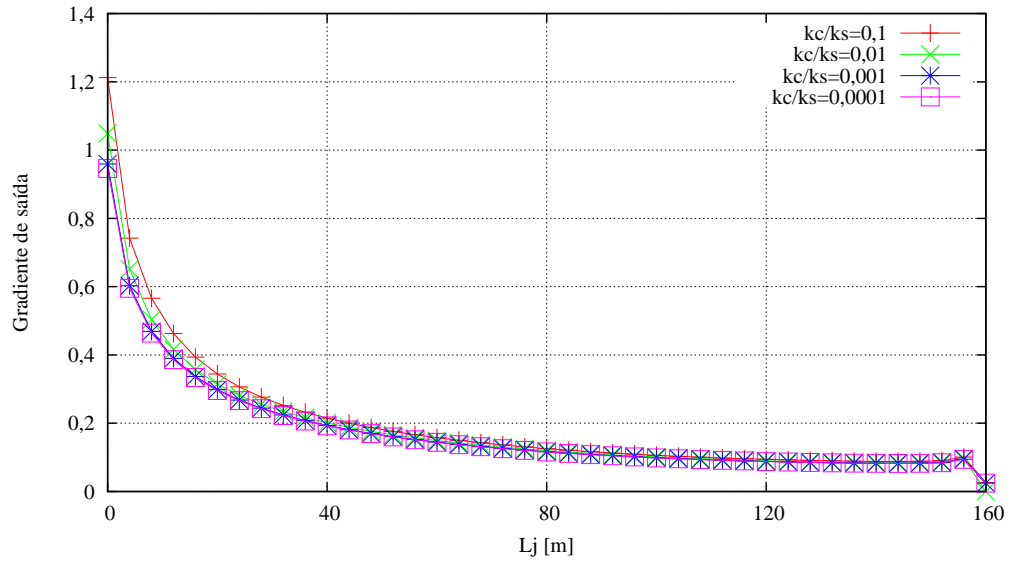


Figura 4.20: Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante

Na figura 4.21 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada relação de permeabilidade considerada. Os valores encontram-se na tabela A.8 do anexo.

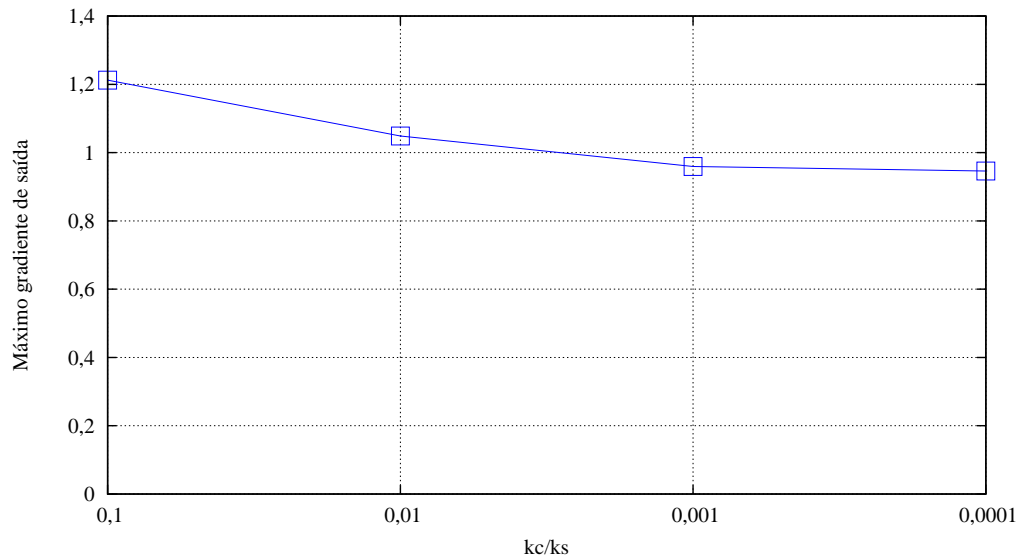


Figura 4.21: Valores do gradiente de saída máximo com a variação do coeficiente de permeabilidade da cortina

Verifica-se, tal como nas duas grandezas anteriores, que a diferença mais significativa no controlo do gradiente de saída resulta da alteração da relação de $k_c/k_s = 0,1$ para $k_c/k_s = 0,001$. Na figura 4.21 é também possível observar que desde $k_c/k_s = 0,001$ até $k_c/k_s =$

0,0001, o gráfico traduz-se numa linha horizontal.

4.6 Comparação com outros autores

4.6.1 Introdução

Após a análise paramétrica realizada, procurou-se comparar os resultados obtidos com estudos semelhantes, realizados por outros autores, relativamente à influência do comprimento, inclinação e posição da cortina de impermeabilização. Relativamente à influência do comprimento, foram comparados resultados referentes à carga hidráulica (Mascarenhas, 1979; Moharrami et al., 2014) e ao gradiente de saída (Moharrami et al., 2014). Para a influência da inclinação, foram comparados resultados relativamente à carga hidráulica e ao gradiente de saída (Al-saadi et al., 2011; Moharrami et al., 2014). Relativamente à influência da localização, foram apresentadas comparações relativas à carga hidráulica, ao caudal e ao gradiente de saída (Mansuri et al., 2014).

4.6.2 Análise do comprimento

Na tabela 4.6 são apresentadas as características dos modelos utilizados pelos diferentes autores para o estudo da influência do comprimento. As relações estudadas, embora diferentes, permitem efetuar as comparações apresentadas em seguida.

Tabela 4.6: Estudo da influência do comprimento: modelos e relações utilizados

Autores	Mascarenhas (1979)	Moharrami et al. (2014)	Estudo Paramétrico
Relação	$L_c/L_b=0; 0,375; 0,625; 1,125$	$L_c/L_b=0,1; 0,2, 0,3; 0,4$	$L_c/L_b=0,2; 0,4, 0,5; 0,8; 1,6$
Permeabilidade da cortina	$k_c=10^{-9} m \cdot s^{-1}$	$k_c=0 m \cdot s^{-1}$ (impermeável)	$k_c=10^{-8} m \cdot s^{-1}$
Permeabilidade do solo	$k_c = 10^{-5} m \cdot s^{-1}$	$k_c = 10^{-5} m \cdot s^{-1}$	$k_c = 10^{-5} m \cdot s^{-1}$
Geometria	$L_b=100$ m	$L_b=60$ m	$L_b=40$ m
	$H=80$ m	$H=30$ m	$H=40$ m
	$H_j=0$ m	$H_j=0$ m	$H_j=0$ m

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.22 o estudo comparativo com

4.6 Comparação com outros autores

Mascarenhas (1979). Para facilitar a comparação, os valores do presente estudo, correspondentes à figura 4.3, foram convertidos em percentagem. Estes cálculos encontram-se nas tabelas A.9 até A.13 do anexo.

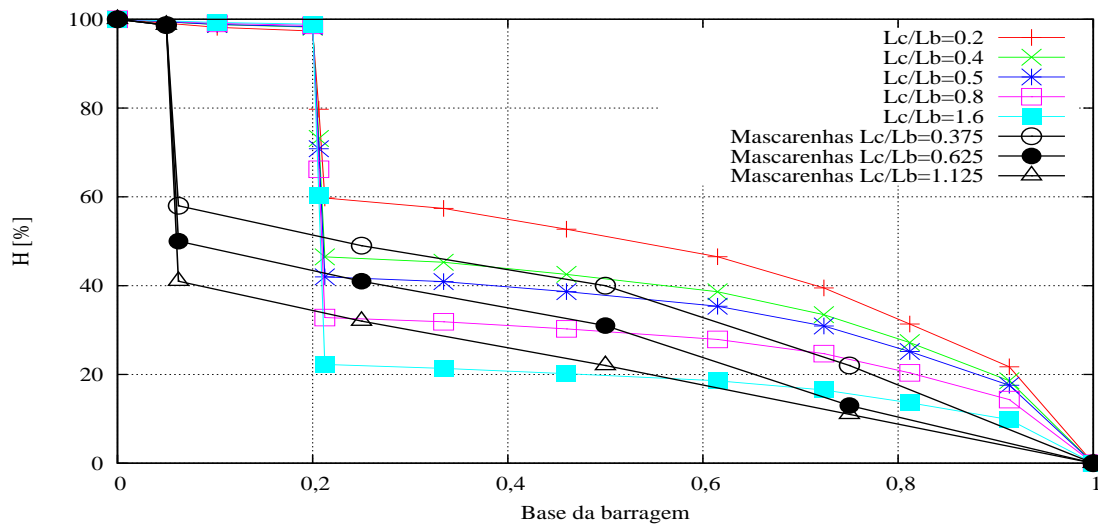


Figura 4.22: Comparação da variação da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina

Verifica-se que, tanto no presente estudo como no estudo realizado por Mascarenhas (1979), existe uma diminuição da carga hidráulica na zona onde se localiza a cortina. As curvas obtidas nos dois estudos apresentam desenvolvimentos bastante semelhantes.

Na figura 4.23 apresenta-se o estudo comparativo da resultante da carga hidráulica com Mascarenhas (1979) e Moharrami et al. (2014). Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.4. Os resultados obtidos por Moharrami et al. (2014), em termos da resultante das subpressões, foram convertidos em percentagem de variação, como indicado na tabela A.14 do anexo.

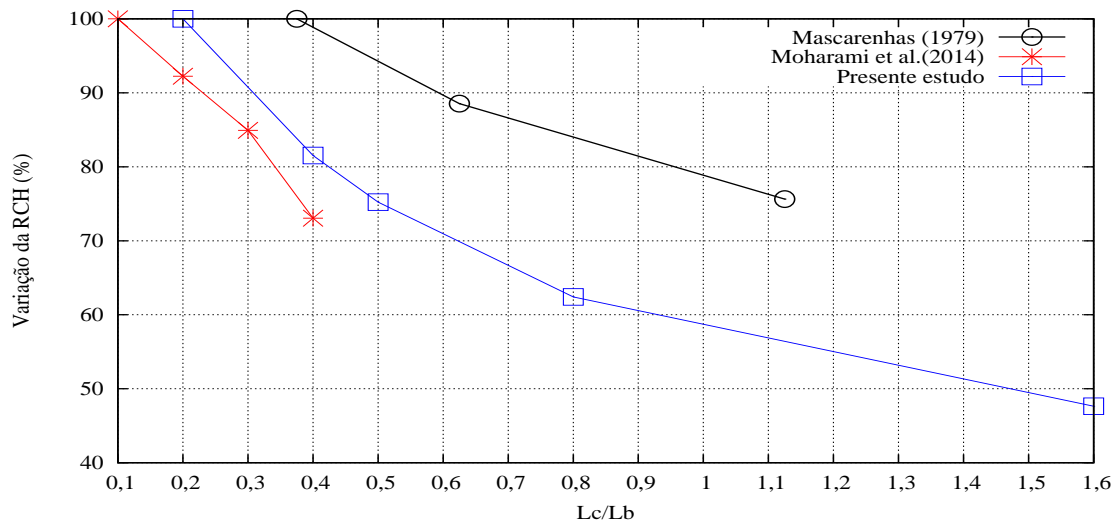


Figura 4.23: Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização

Como se pode verificar, o desenvolvimento das curvas é bastante semelhante demonstrando a mesma tendência na diminuição da resultante da carga hidráulica, com o aumento do comprimento da cortina.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se na figura 4.24 o estudo comparativo realizado. Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.6. Os resultados de Moharrami et al. (2014) encontram-se na tabela A.15 do anexo.

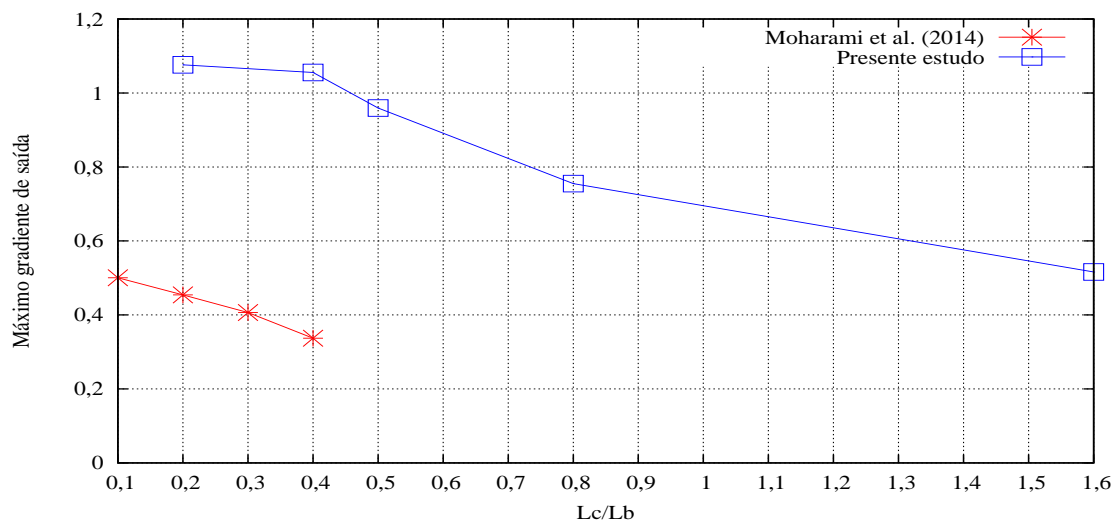


Figura 4.24: Comparação do gradiente de saída com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização

4.6 Comparação com outros autores

Apesar da diferença de valores obtidos nos dois estudos, proveniente da diferença de geometria e características adotadas para os modelos, o desenvolvimento das curvas é bastante semelhante demonstrando uma diminuição do gradiente de saída com o aumento do comprimento da cortina

4.6.3 Análise da inclinação

Na tabela 4.7 são apresentadas as características dos modelos utilizados pelos diferentes autores para o estudo da influência da inclinação. As relações estudadas, embora diferentes, permitem efetuar as comparações apresentadas em seguida.

Tabela 4.7: Estudo da influência da inclinação da cortina: Modelos e relações utilizados

Autores	Al-saadi et al.(2011)	Moharrami et al. (2014)	Estudo Paramétrico
Relação	$\theta=30,60,90$ 120,150	$\theta=20,40,60$ 90,120,140,160	$\theta=30,60,90$ 120,150
Permeabilidade da cortina	$k_c = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (impermeável)	$k_c = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (impermeável)	$k_c=10^{-8}$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Permeabilidade do solo	$k_s = 10^{-5}$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$k_s = 10^{-5}$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$k_s = 10^{-5}$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Geometria	$L_b=15 \text{ m}$ $H = 10\text{m}$ $H_j=0 \text{ m}$	$L_b=60 \text{ m}$ $H=30 \text{ m}$ $H_j=0 \text{ m}$	$L_b=40 \text{ m}$ $H=40 \text{ m}$ $H_j=0 \text{ m}$

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 4.25 o estudo comparativo com Al-saadi et al. (2011). Para facilitar a comparação, os valores do presente estudo, correspondentes à figura 4.8, foram convertidos em percentagem. Estes cálculos encontram-se nas tabelas A.16 até A.20 do anexo.

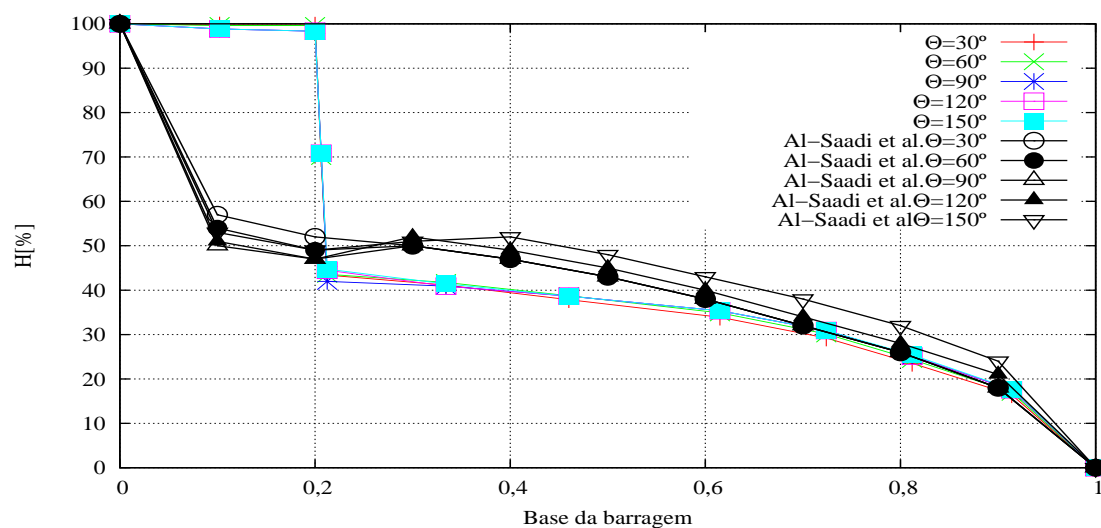


Figura 4.25: Comparação da variação da carga hidráulica com a variação da inclinação da cortina

Verifica-se, além da diminuição existente na zona onde se localizam as cortinas, um andamento idêntico das curvas nos dois modelos.

Na figura 4.26 apresenta-se o estudo comparativo da resultante da carga hidráulica com Al-saadi et al. (2011) e Moharrami et al. (2014). Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.9. Os resultados obtidos por Moharrami et al. (2014), em termos da resultante das subpressões, foram convertidos em percentagem de variação, como indicado na tabela A.21 do anexo.

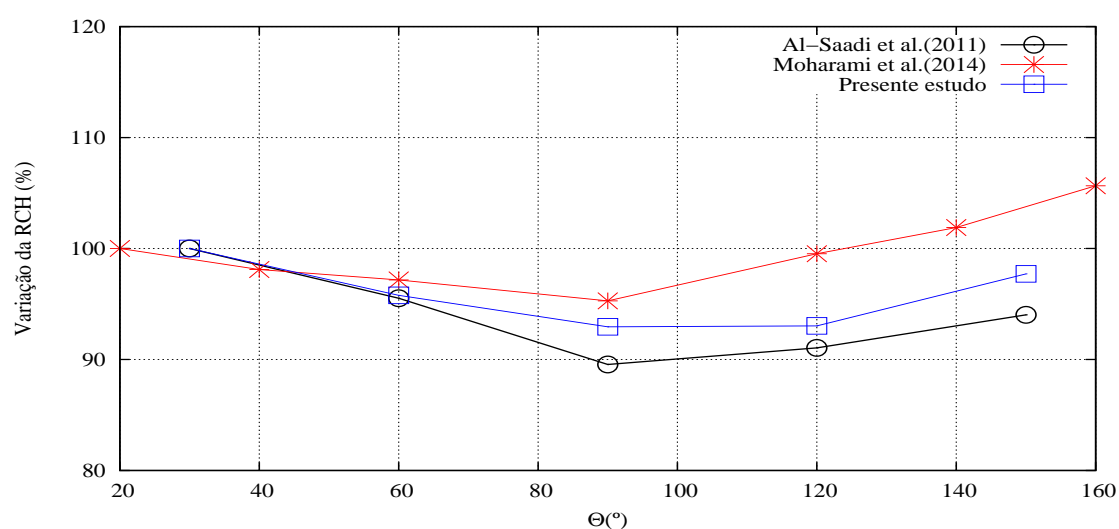


Figura 4.26: Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização

4.6 Comparação com outros autores

Verifica-se que existe conformidade no desenvolvimento das curvas obtidas, o que permite concluir que, dadas as diferenças geométricas e dos materiais dos modelos, a inclinação da cortina não tem influência significativa na redução da resultante da carga hidráulica.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se na figura 4.27 o estudo comparativo realizado. Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.11. Os resultados de Moharrami et al. (2014) encontram-se na tabela A.22 do anexo.

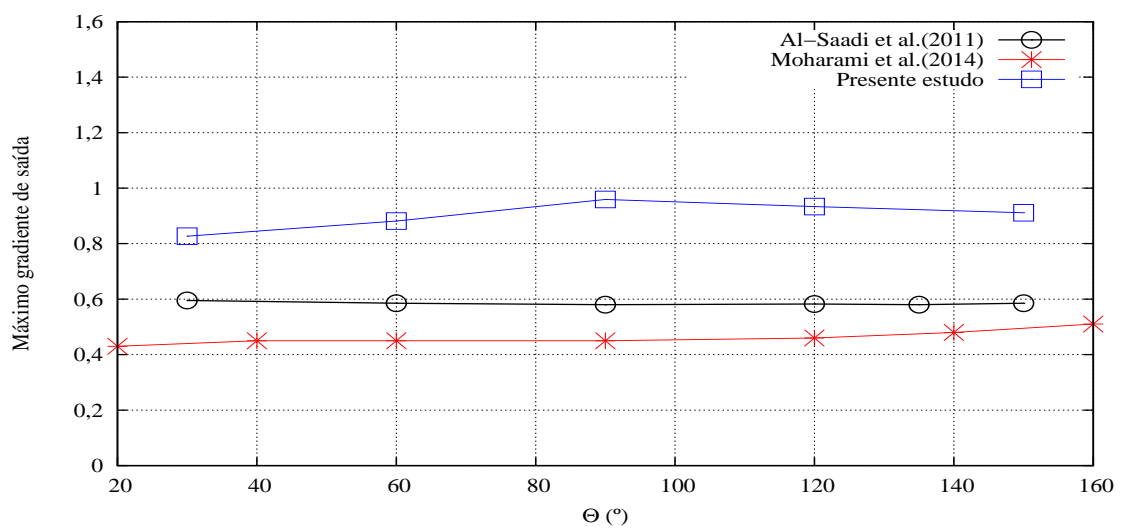


Figura 4.27: Comparação do gradiente de saída com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização

Tal como anteriormente, verifica-se também uma concordância no desenvolvimento das curvas e a conclusão a retirar é idêntica: não existe influência da inclinação das cortinas na diminuição do gradiente de saída.

4.6.4 Análise da localização

Na tabela 4.8 são apresentadas as características dos modelos utilizados pelos diferentes autores para o estudo da influência da localização. As relações estudadas permitem efetuar as comparações apresentadas em seguida.

Tabela 4.8: Estudo posição da cortina: modelos e relações utilizados

Autores	Mansuri et al. (2014)	Estudo Paramétrico
Relação	$x_c/L_b=0,2, 04$ $0,6,0,8$	$x_c/L_b=0,2, 04$ $0,6, 0,8$
Permeabilidade da cortina	$k_c = 10^{-9}$ $m \cdot s^{-1}$	$k_c = 10^{-8}$ $m \cdot s^{-1}$
Permeabilidade do solo	$k_s = 10^{-5}$ $m \cdot s^{-1}$	$k_s = 10^{-5}$ $m \cdot s^{-1}$
Geometria	$L_b=10$ m $H=10$ m $H_j=0$ m	$L_b=40$ m $H=40$ m $H_j=0$ m

Na figura 4.28 apresenta-se o estudo comparativo da resultante da carga hidráulica com Mansuri et al. (2014). Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.14. Os resultados obtidos por Mansuri et al. (2014), em termos de resultante da carga hidráulica, foram convertidos em percentagem de variação, como indicado na tabela A.23 do anexo.

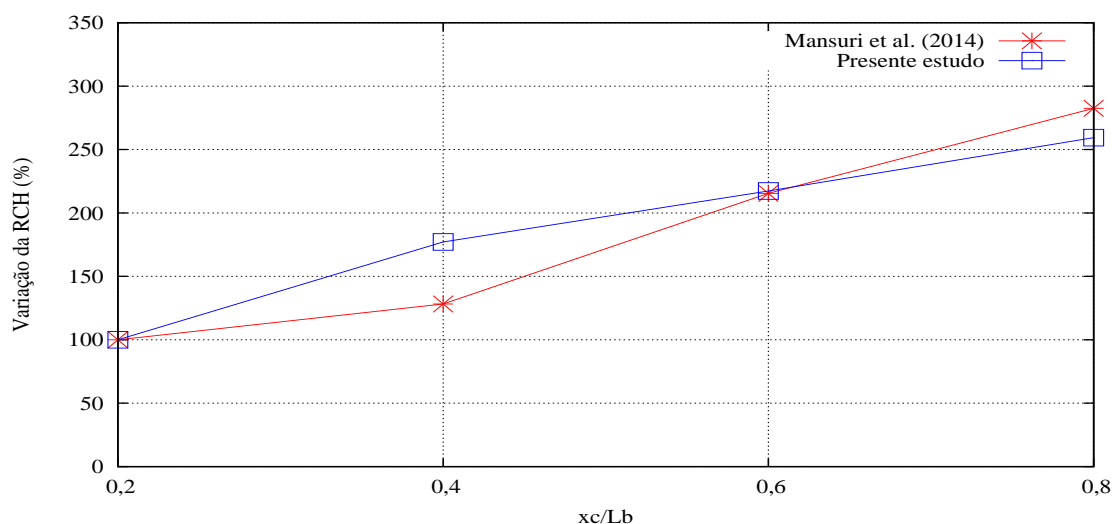


Figura 4.28: Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação da posição da cortina

Como se pode verificar na figura 4.28, a resultante da carga hidráulica também aumenta à medida que a cortina se desloca para jusante. Apesar de atingir valores iniciais maiores no caso estudado, no final os valores obtidos por Mansuri et al. (2014) invertem esta tendência muito provavelmente devido às diferenças dos modelos utilizados.

4.6 Comparação com outros autores

Na figura 4.28 apresenta-se o estudo comparativo do rácio de descarga com Mansuri et al. (2014). Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.14. Os resultados obtidos por Mansuri et al. (2014), em termos de rácio de descarga, relativamente a uma base diferente, foram convertidos em percentagem de variação, como indicado na tabela A.24 do anexo.

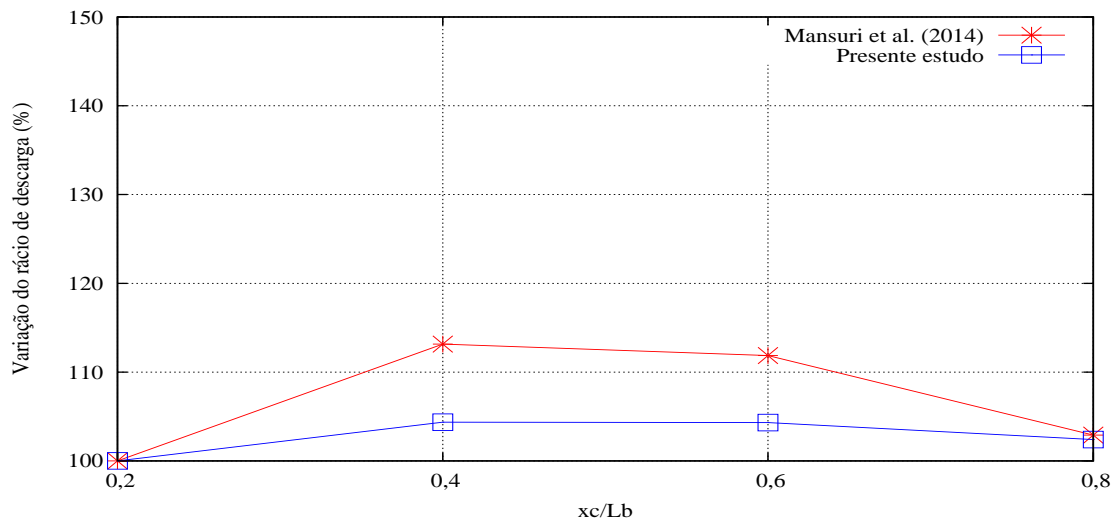


Figura 4.29: Comparação do rácio de descarga com a variação da posição da cortina

Relativamente ao rácio de descarga, os resultados apresentam um comportamento muito semelhante. Como se pode verificar na figura 4.29, as linhas obtidas são praticamente horizontais o que significa que não existe diferenças significativas em ambos os casos.

Na figura 4.30 apresenta-se o estudo comparativo do gradiente de saída com Mansuri et al. (2014). Os resultados do presente estudo correspondem à figura 4.16. Os resultados obtidos por Mansuri et al. (2014), em termos de um rácio de descarga, relativamente a uma base diferente, foram convertidos em percentagem de variação, como indicado na tabela A.25 do anexo.

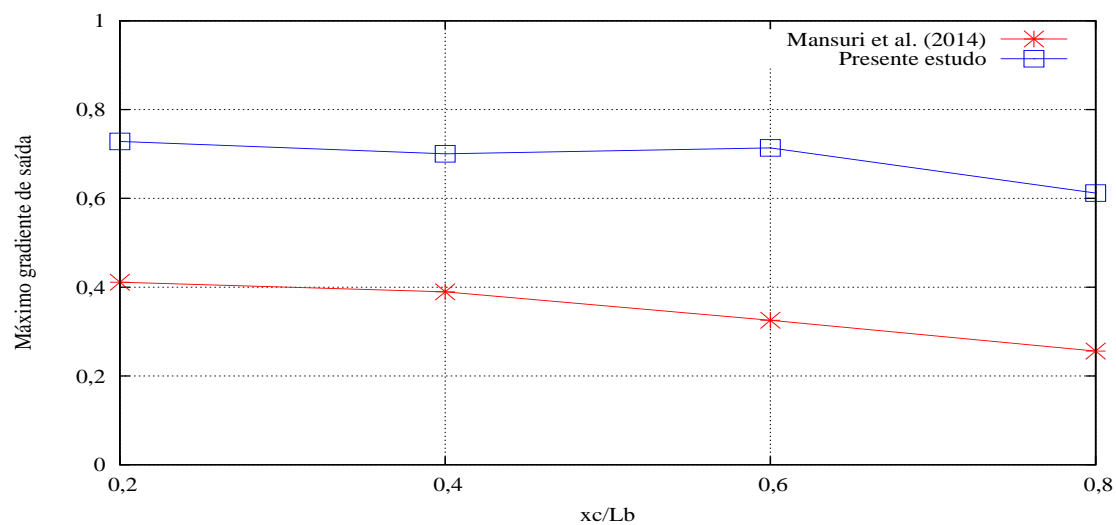


Figura 4.30: Comparação do gradiente de saída com a variação da posição da cortina

Como se pode verificar os maiores valores acontecem quando a cortina se situa a montante e o menor quando esta se situa a jusante. Tal como no rácio de descarga o comportamento das duas curvas é bastante semelhante, não existindo diferenças expressivas com a variação da posição da cortina.

Capítulo 5

Análise paramétrica: Modelo com cortina de drenagem

5.1 Introdução

No presente capítulo, apresenta-se uma análise paramétrica utilizando um modelo com utilização conjunta de uma cortina de impermeabilização e de uma cortina de drenagem tendo-se efetuado alterações no comprimento, posição e inclinação da cortina de drenagem. Pretende-se assim verificar a influência da introdução de uma cortina de drenagem e verificar o seu efeito na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída.

Com os resultados alcançados, realizou-se um estudo comparativo com outro autor que abordou a influência do comprimento da cortina de drenagem.

Na figura 5.1 apresenta-se o modelo utilizado para o estudo paramétrico. O modelo é semelhante ao utilizado no capítulo 4, com as designações das tabelas 3.2 e 3.5. O solo de fundação possui um comprimento a montante, um comprimento a jusante e uma profundidade de 160 metros ($L_m = L_j = L_q = 4 \cdot L_b = 160 \text{ m}$), uma altura de água a montante de 40 metros e sem água a jusante. O comprimento da base da barragem é de 40 metros. O coeficiente de permeabilidade do solo de fundação é de $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A cortina de impermeabilização mantém, em todas as análises efetuadas, os 20 metros de comprimento ($L_c/L_b=0,5$), dista 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b=0,2$) e o seu coeficiente de permeabilidade é de $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($k_c/k_s=0,001$). A cortina de impermeabilização apenas alterou a inclinação consoante a rotação da cortina de drenagem.

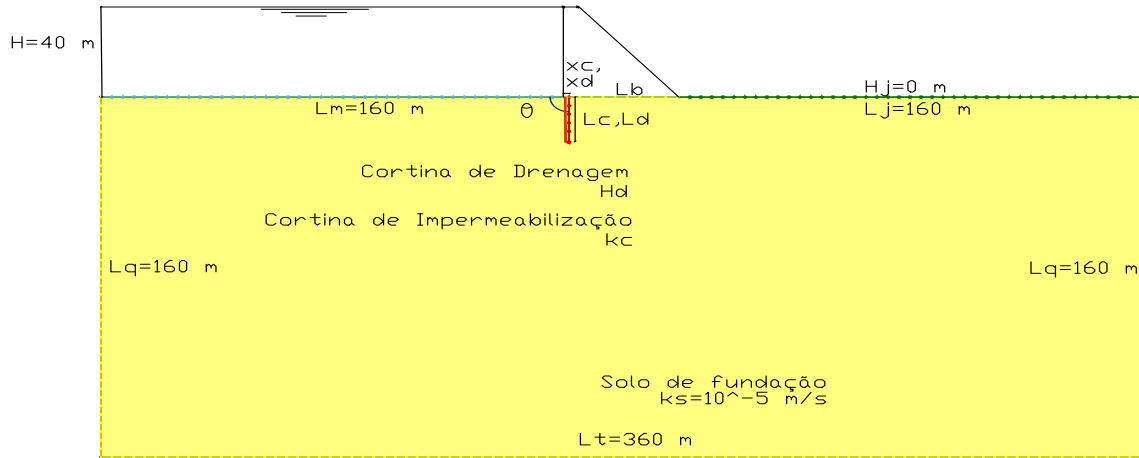


Figura 5.1: Definição do modelo utilizado

Na tabela 5.1, definiu-se, para cada análise realizada, os parâmetros que se mantiveram e os que foram alterados. Para estes últimos, apresenta-se ainda as variações que foram realizadas, de forma adimensional, tal como no capítulo anterior.

Relativamente à cortina de drenagem, o parâmetro que se manteve constante em todas as análises foi o valor da carga hidráulica na zona onde esta se localiza. Para este estudo foi definida com $H_d=0$ m, o que equivale a admitir que a cortina foi executada na perfeição e que a pressão na cortina de drenagem é igual à pressão atmosférica.

Na primeira análise efetuada, sobre a influência do comprimento, manteve-se a cortina de drenagem na vertical ($\theta = 90^\circ$) a 8 metros do paramento de montante ($x_d/L_d=0,2$), imediatamente a jusante da cortina de impermeabilização. As alterações no comprimento da cortina, relativamente ao comprimento da base da barragem, correspondem a 8, 16, 20, 32 e 64 metros.

Na segunda análise, sobre a influência da inclinação, manteve-se a cortina de drenagem com 20 metros de comprimento ($L_d/L_b=0,5$) a 8 metros do paramento ($x_d/L_b=0,2$), imediatamente a jusante da cortina de impermeabilização. As alterações na inclinação da cortina correspondem a 30° , 60° , 90° , 120° e 150° .

Na ultima análise, sobre a influência da posição, a cortina de drenagem manteve-se com 20 metros de comprimento ($L_d/L_b=0,5$) e na vertical ($\theta = 90^\circ$). As alterações na posição da cortina, relativamente ao comprimento da base da barragem, correspondem a 8, 16, 24 e 32 metros, desde o paramento de montante.

5.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

Tabela 5.1: Relações e valores utilizados no estudo paramétrico com cortina de impermeabilização e drenagem

Parâmetros inalterados	Parâmetros alterados	Variações analisadas
Ângulo($\theta = 90^\circ$) Posição($x_d/L_b = 0,2$)	Comprimento	$L_d/L_b=0,2$ $L_d/L_b=0,4$ $L_d/L_b=0,5$ $L_d/L_b=0,8$ $L_d/L_b=1,6$
Comprimento($L_d/L_b=0,5$) Posição($x_d/L_b=0,2$)	Ângulo	$\theta = 30^\circ$ $\theta = 60^\circ$ $\theta = 90^\circ$ $\theta = 120^\circ$ $\theta = 150^\circ$
Comprimento($L_d/L_b=0,5$) Ângulo($\theta = 90^\circ$)	Posição	$x_d/L_b=0,2$ $x_d/L_b=0,4$ $x_d/L_b=0,6$ $x_d/L_b=0,8$

5.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

Pretende-se verificar até que ponto o aumento do comprimento da cortina de drenagem produz efeitos significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 5.1, a cortina de drenagem permanece na posição vertical ($\theta = 90^\circ$) e dista 8 metros do paramento de montante ($x_d/L_b = 0,2$), imediatamente a jusante da cortina de impermeabilização.

Na figura 5.2 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação para a cortina de menor ($L_d/L_b = 0,2$) e maior comprimento ($L_d/L_b = 1,6$).

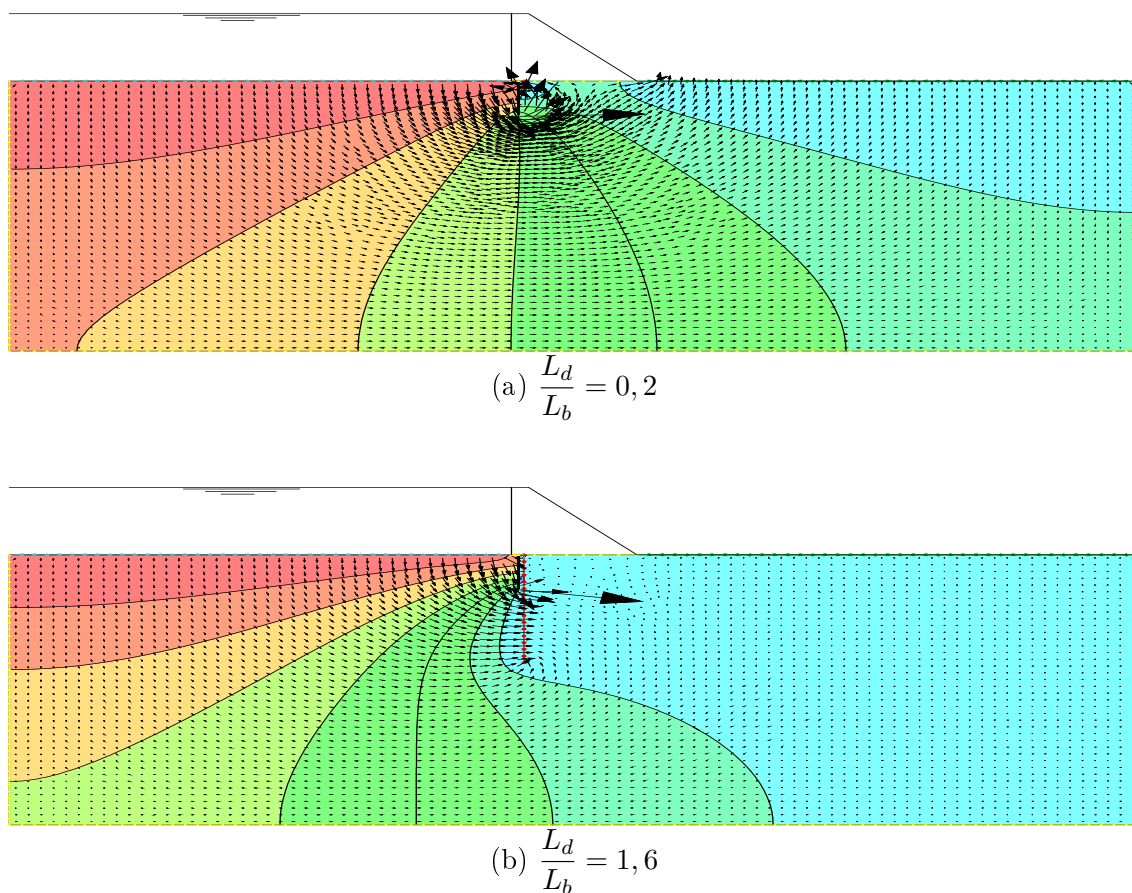


Figura 5.2: Caudal e linhas equipotenciais com a variação do comprimento da cortina de drenagem

É possível observar que com o aumento do comprimento da cortina de drenagem, o caudal que a ultrapassa diminui.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 5.3 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, com o aumento do comprimento da cortina de drenagem.

5.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

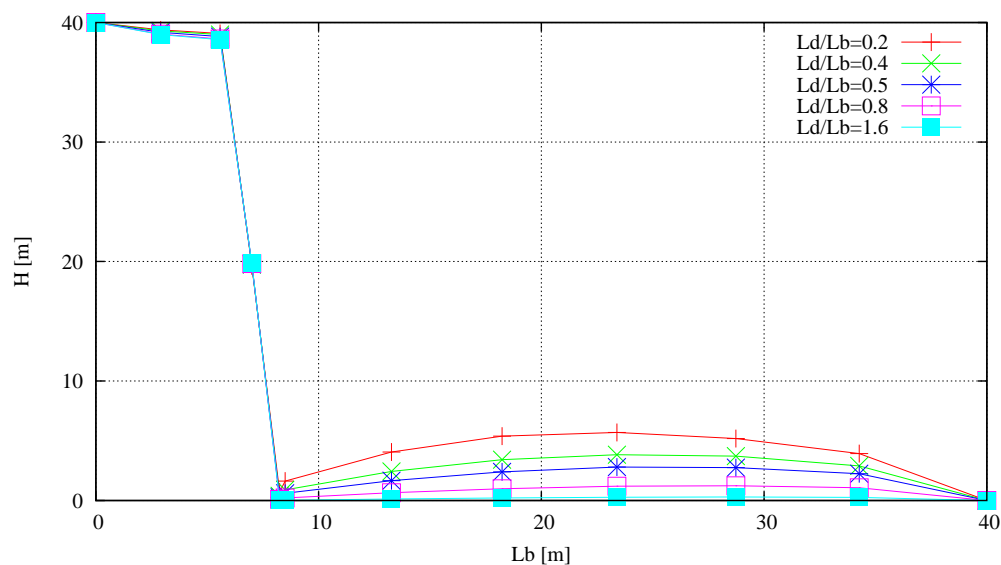


Figura 5.3: Variação da carga hidráulica com o aumento do comprimento da cortina de drenagem

Verifica-se que após a zona onde se situa a cortina de drenagem, com carga hidráulica nula, existe um ligeiro aumento da carga hidráulica. Este aumento é menor quanto maior for o comprimento da cortina de drenagem.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 5.2 os valores obtidos, para cada comprimento considerado.

Tabela 5.2: Variação do caudal com o aumento do comprimento da cortina de drenagem

Ld/Lb	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
0,2	$2,43 \cdot 10^{-4}$
0,4	$2,11 \cdot 10^{-4}$
0,5	$1,84 \cdot 10^{-4}$
0,8	$1,26 \cdot 10^{-4}$
1,6	$0,78 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se uma redução bastante significativa do valor do caudal para a cortina de maior comprimento, o que está de acordo com o referido anteriormente na figura 5.2, quanto maior a cortina menor é o caudal que chega a jusante.

Na figura 5.4 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as diferentes relações de comprimento consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.26 do anexo, foram calculados segundo a equação 3.1.

Na mesma figura apresenta-se os resultados da variação do rácio de descarga (RD) para as diferentes relações de comprimento consideradas. Estes valores foram calculados segundo a equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- i- corresponde a cada relação considerada, neste caso $\frac{L_d}{L_b} = 0,2, 0,4, 0,5, 0,8$ e $1,6$
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\frac{L_d}{L_b} = 0,2$

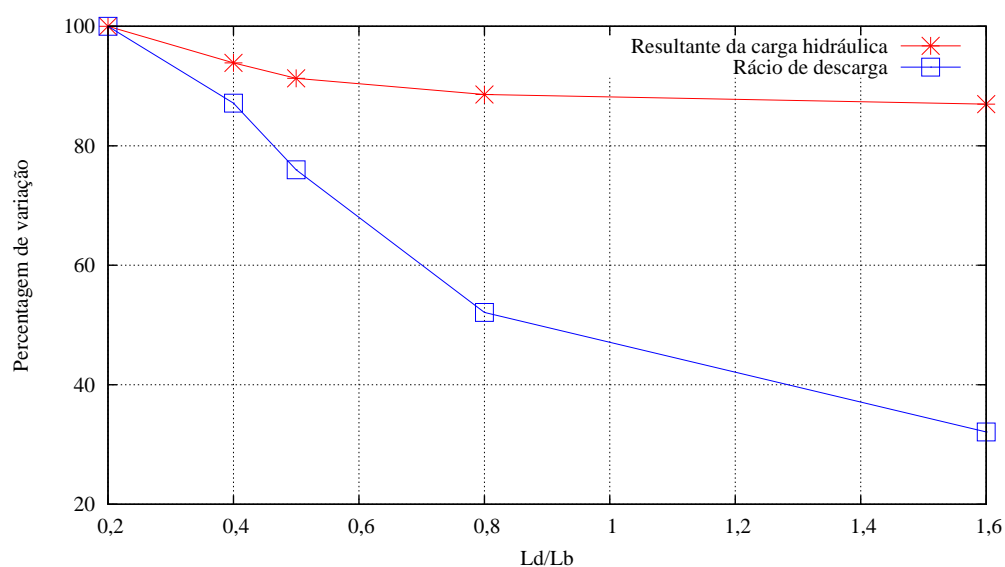


Figura 5.4: Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com o aumento do comprimento da cortina de drenagem

O aumento da cortina de drenagem de $L_d/L_b = 0,2$ para $L_d/L_b = 1,6$ permitiu uma redução da resultante da carga hidráulica em cerca de 13%, como pode ser observado na figura 5.4. Na mesma figura verifica-se que a alteração do comprimento da cortina de $L_d/L_b = 0,2$ para $L_d/L_b = 1,6$ provocou uma redução do caudal de cerca de 70%, o que resulta numa diminuição bastante significativa desta grandeza.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se na figura 5.5 o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante da barragem até ao fim do modelo considerado.

5.2 Estudo da influência do comprimento da cortina

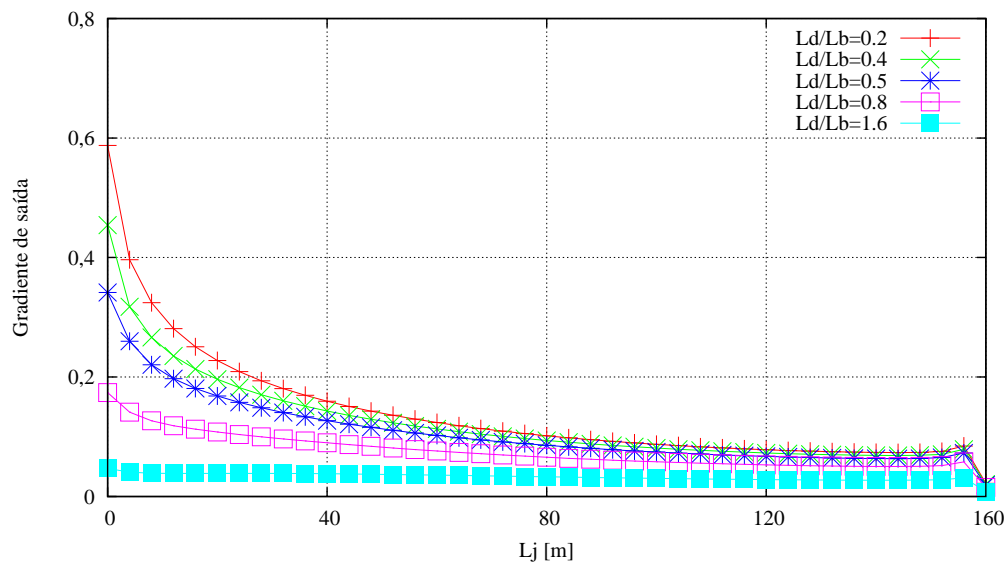


Figura 5.5: Desenvolvimento do gradiente saída ao longo do lado jusante

Como se pode verificar os valores iniciais apresentam variações muito significativas.

Na figura 5.6 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada comprimento considerado. Os valores encontram-se na tabela A.27 do anexo.

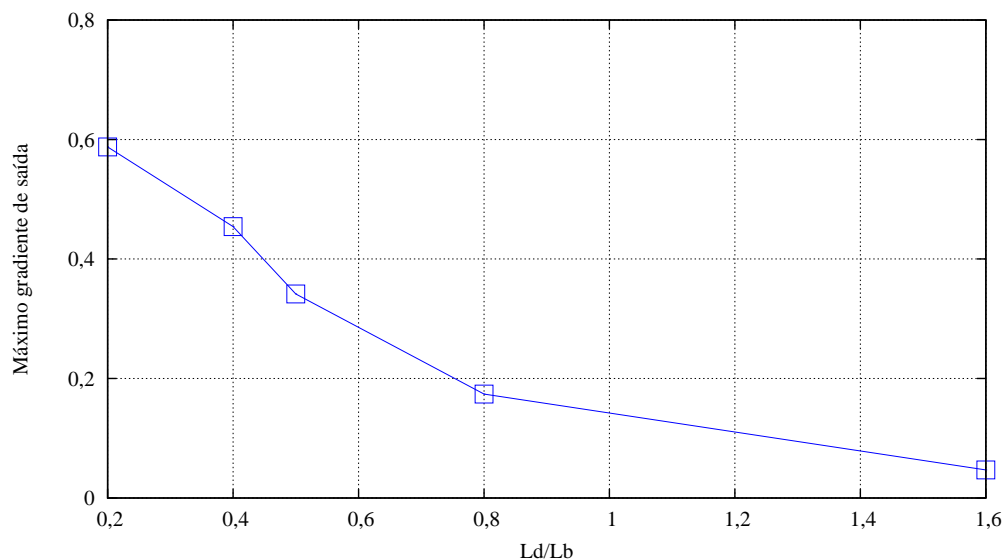


Figura 5.6: Valores dos gradientes de saída máximo com o aumento do comprimento da cortina de drenagem

Na figura 5.6 é possível observar que a redução do gradiente de saída é de aproximadamente 90%.

5.3 Estudo da influência da inclinação das cortina

Pretende-se verificar qual a inclinação da cortina que produz efeitos mais significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 5.1, a cortina de drenagem mantém o seu comprimento de 20 metros ($L_d/L_b = 0,5$) e dista 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b = 0,2$), ou seja, encontra-se imediatamente após a cortina de impermeabilização.

Na figura 5.7 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação para a cortina menos inclinada ($\theta = 30^\circ$) e para a cortina mais inclinada ($\theta = 150^\circ$).

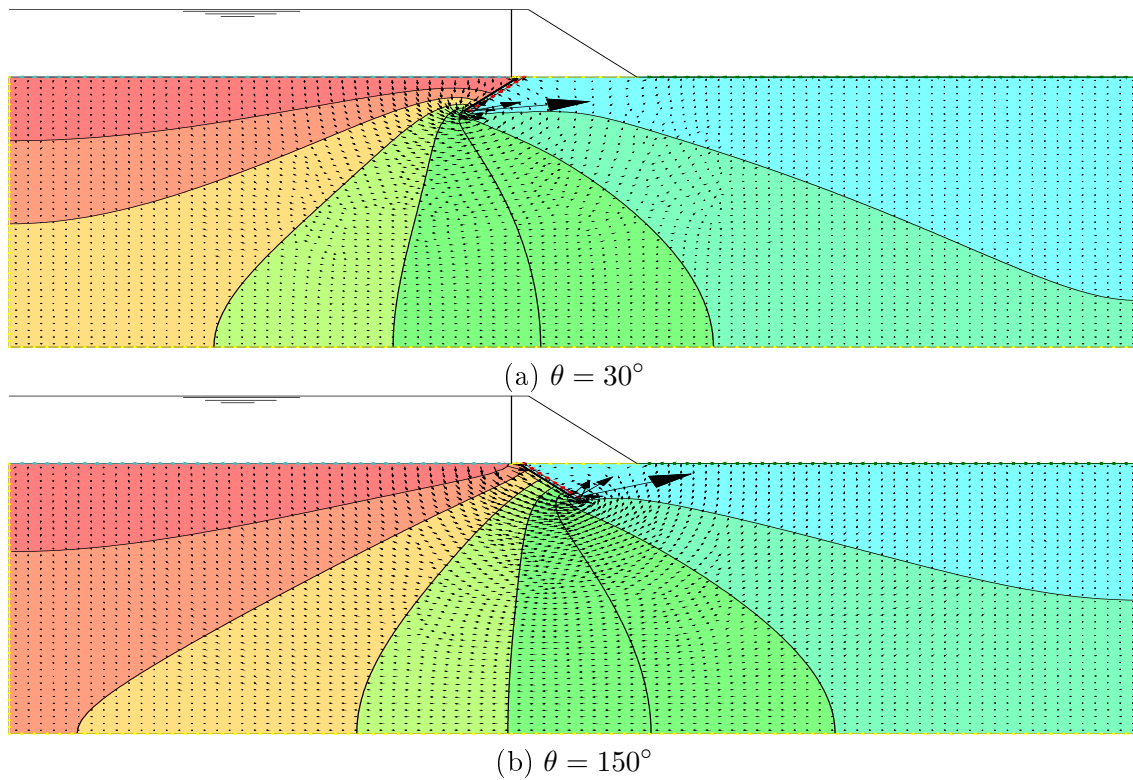


Figura 5.7: Caudal e linhas equipotenciais com a variação da inclinação das cortinas

Na figura 5.7 é possível observar que independentemente da orientação da cortina de impermeabilização, não se verificam alterações das linhas equipotenciais na base da barragem.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 5.8 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, para as diferentes inclinações adotadas.

5.3 Estudo da influência da inclinação das cortina

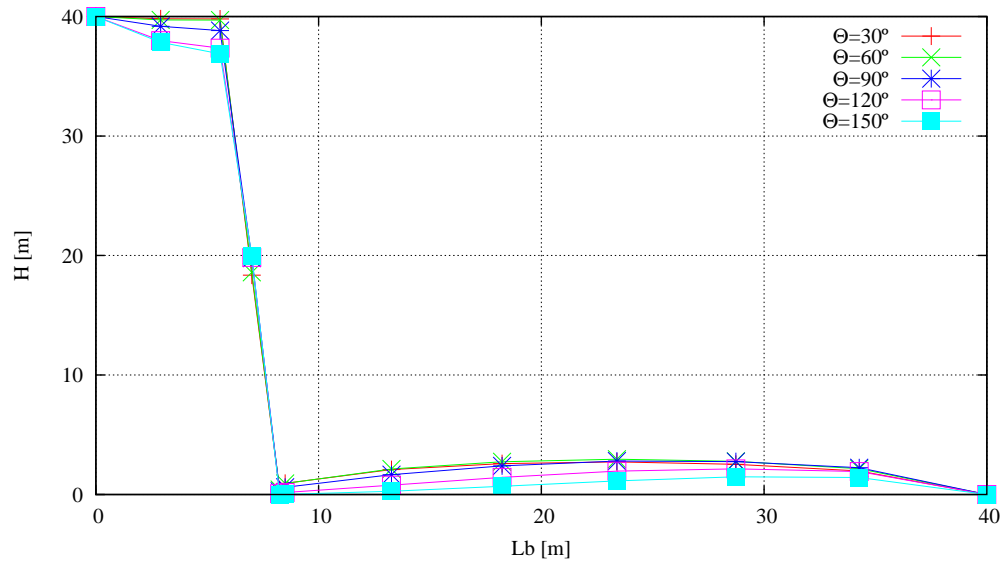


Figura 5.8: Variação da carga hidráulica com a inclinação das cortinas

Como se pode observar, independentemente da inclinação da cortina, o desenvolvimento das linhas obtidas não apresenta diferenças significativas, encontrando-se mais ou menos sobrepostas.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 5.3 os valores obtidos, para cada inclinação considerada.

Tabela 5.3: Variação do caudal com a inclinação das cortinas de impermeabilização e de drenagem

θ	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
30	$1,52 \cdot 10^{-4}$
60	$1,67 \cdot 10^{-4}$
90	$1,84 \cdot 10^{-4}$
120	$1,94 \cdot 10^{-4}$
150	$1,97 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se que existe um aumento do caudal quando a cortina se inclina para jusante. No entanto, os resultados não sofreram variações expressivas, o que está de acordo com o que foi dito relativamente à figura 5.7.

Na figura 5.9 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as diferentes inclinações consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.28 do anexo, foram calculados segundo a equação 3.1. Na mesma

figura apresentam-se os resultados da variação do rácio de descarga (RD) para as diferentes inclinações consideradas. Estes valores foram calculados utilizando a equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- i - corresponde a cada relação considerada, neste caso para as várias inclinações $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$.
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\theta = 30^\circ$.

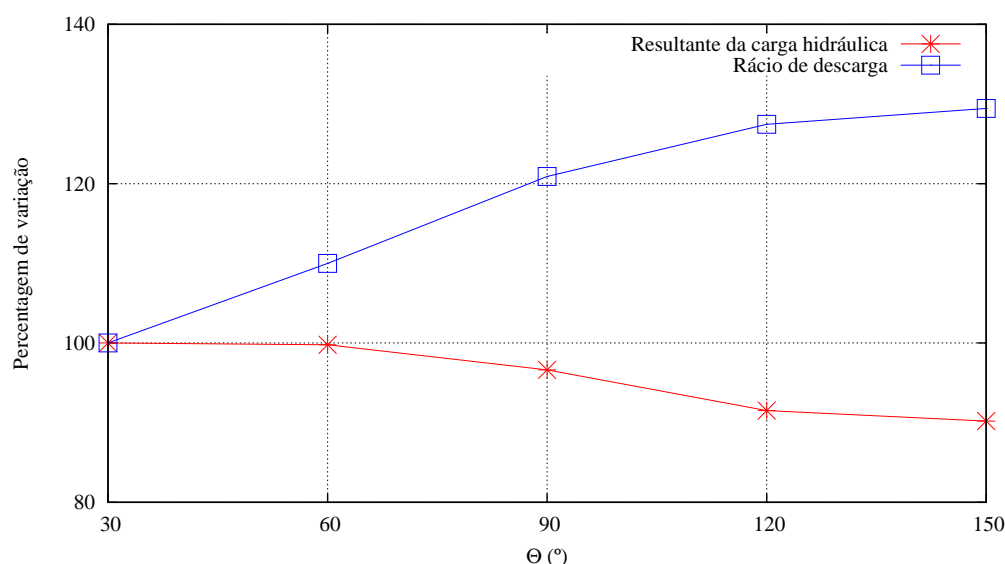


Figura 5.9: Percentagem de variação da resultante de carga hidráulica e do rácio de descarga com a inclinação das cortinas

Verifica-se que a mudança de $\theta = 30^\circ$ para $\theta = 60^\circ$ não produz variações na resultante da carga hidráulica (o troço é horizontal). A partir deste ponto surge uma diminuição da resultante, embora inferior a 10%. Verifica-se o que foi dito relativamente aos valores do caudal obtidos, ou seja, existe um aumento desta grandeza quando a cortina se inclina para jusante. Apesar do aumento (cerca de 30%), verifica-se que este aumento tende para um patamar uma vez que o último troço da curva obtida se traduz numa linha horizontal.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se na figura 5.10, o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante da barragem até ao fim do modelo.

5.3 Estudo da influência da inclinação das cortina

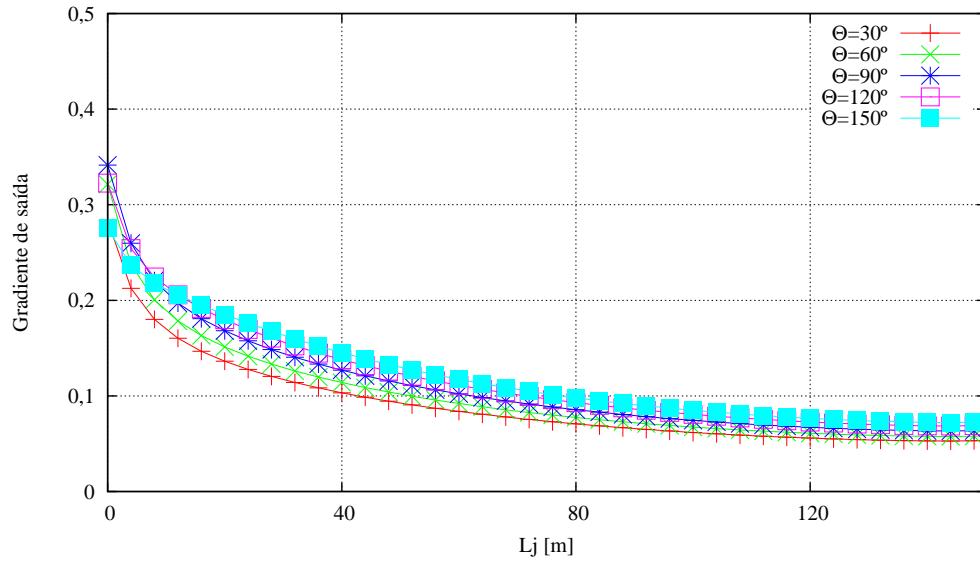


Figura 5.10: Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante

Na figura 5.11 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada inclinação considerada. Os valores encontram-se na tabela A.29, do anexo.

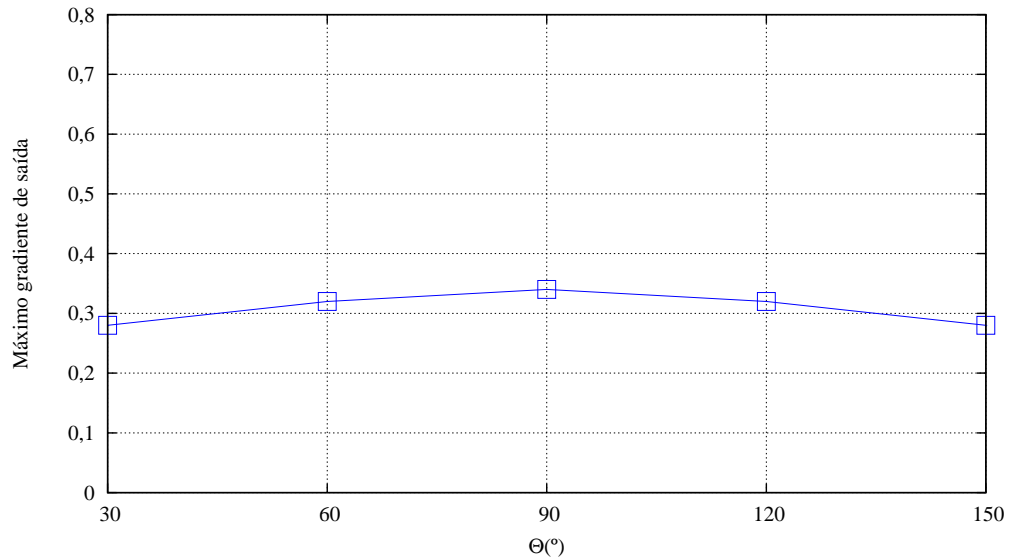


Figura 5.11: Valores do gradiente de saída máximo com a variação da inclinação das cortinas

Observa-se que as variações existentes são pouco acentuadas. Verifica-se que o valor máximo ocorre quando a cortina se encontra na posição vertical ($\theta = 90^\circ$).

5.4 Estudo da influência da localização da cortina

Pretende-se verificar qual a localização da cortina que produz efeitos mais significativos na carga hidráulica, no caudal e no gradiente de saída. Como indicado na tabela 5.1, a cortina permanece na posição vertical ($\theta = 90^\circ$) e com comprimento igual a 20 metros ($L_c/L_b = 0,5$).

Na figura 5.12 apresenta-se as linhas equipotenciais e o caudal que flui no solo de fundação para a cortina localizada mais a montante ($x_c/L_b = 0,2$) e para a cortina localizada mais a jusante ($x_c/L_b = 0,8$)

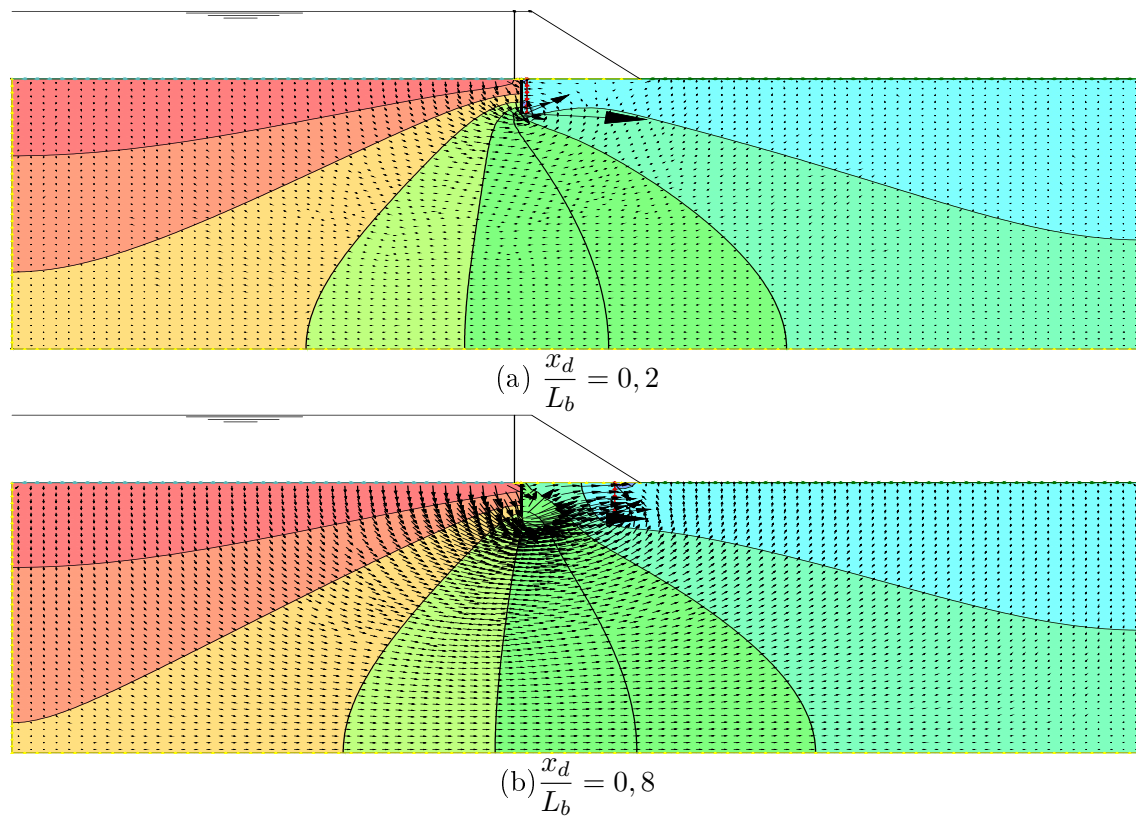


Figura 5.12: Caudal e linhas equipotenciais com a variação da localização da cortina de drenagem

De acordo com a figura 5.12, é possível observar que à medida que a cortina de drenagem se posiciona mais para jusante, as linhas equipotenciais de montante acompanham o seu movimento, ainda que afetadas pela cortina de impermeabilização, ficando assim sob a base da barragem.

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 5.13 o seu desenvolvimento, ao longo da base da barragem, para as diferentes posições consideradas.

5.4 Estudo da influência da localização da cortina

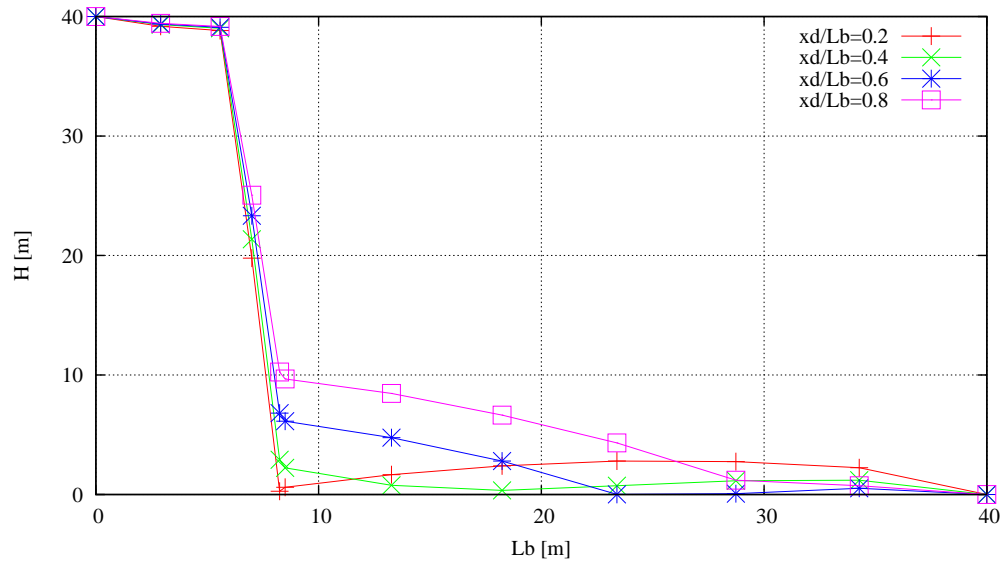


Figura 5.13: Variação da carga hidráulica com a localização da cortina de drenagem

Verifica-se que existe uma redução inicial motivada pela presença da cortina de impermeabilização. No entanto, as reduções mais expressivas só acontecem na zona onde se encontra a cortina de drenagem.

Relativamente ao caudal, obtido da forma descrita em 3.3.2 na secção assinalada na figura 3.7, apresenta-se na tabela 5.4 os valores obtidos, para cada localização considerada.

Tabela 5.4: Variação do caudal com a alteração de posição da cortina de drenagem

x_d/L_b	$Q(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
0,2	$1,84 \cdot 10^{-4}$
0,4	$1,69 \cdot 10^{-4}$
0,5	$1,61 \cdot 10^{-4}$
0,8	$1,53 \cdot 10^{-4}$

Verifica-se uma diminuição dos valores dos caudais, embora pouco expressiva.

Na figura 5.14 apresenta-se os resultados da percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH), para as várias posições consideradas. Estes valores, apresentados na tabela A.30 do anexo, foram calculados utilizando a equação 3.1. Na mesma figura apresenta-se os resultados da variação do rácio de descarga (RD) para as diferentes localizações consideradas. Estes valores foram calculados utilizando a equação 3.2. Nestas equações, descritas em 3.3.2, a percentagem de variação (PV) da resultante da carga hidráulica (RCH) e o rácio de descarga (RD) foram calculados com:

- $\frac{x_d}{L_b}$ - corresponde a cada relação considerada, neste caso para as várias posições $\frac{x_d}{L_b} = 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8$ e $1,6$
- min - corresponde ao mínimo de cada relação considerada, neste caso a $\frac{x_d}{L_b} = 0,2$

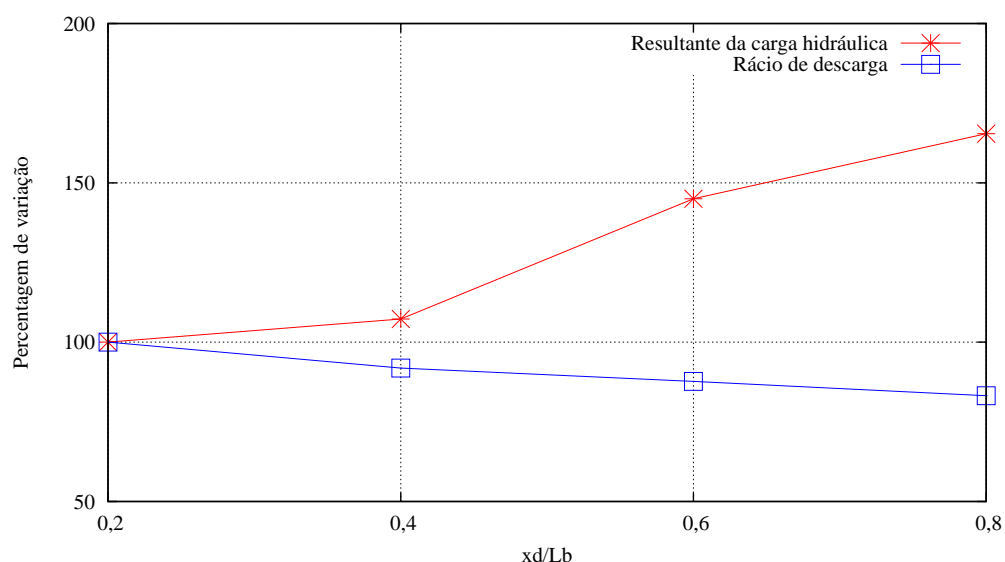


Figura 5.14: Percentagem de variação da resultante da carga hidráulica e do rácio de descarga com a localização da cortina de drenagem

Verifica-se um aumento bastante expressivo da resultante da carga hidráulica, tal como se verificou no modelo que utiliza apenas a cortina de impermeabilização. Quanto ao caudal, verificou-se uma redução do seu valor inicial, embora pouco acentuada. Apesar de na figura 5.12 se verificar um aumento do caudal sob a base da barragem, a obtenção do valor do caudal acontece no fim da barragem, tal com explicado na secção 3.3.2, ou seja, depois das cortinas de impermeabilização e de drenagem, daí que se tenha verificado esta diminuição.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se na figura 5.15 o seu desenvolvimento desde o ponto imediatamente a jusante da barragem até ao fim do modelo.

5.4 Estudo da influência da localização da cortina

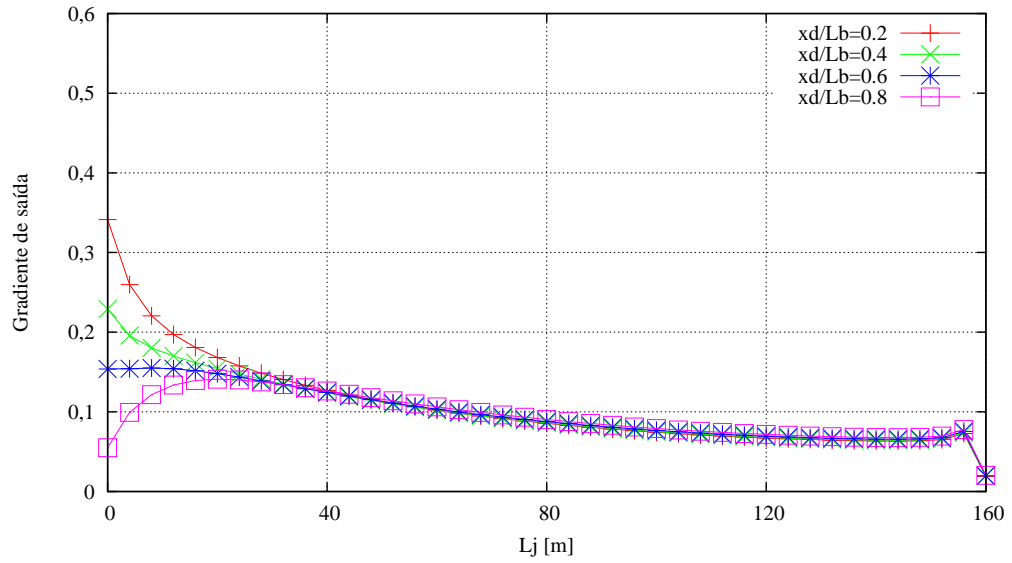


Figura 5.15: Desenvolvimento do gradiente de saída ao longo de jusante

Na figura 5.16 compara-se os valores do gradiente de saída, como referido na secção 3.3.2, para cada posição considerada. Os valores encontram-se na tabela A.31 do anexo.

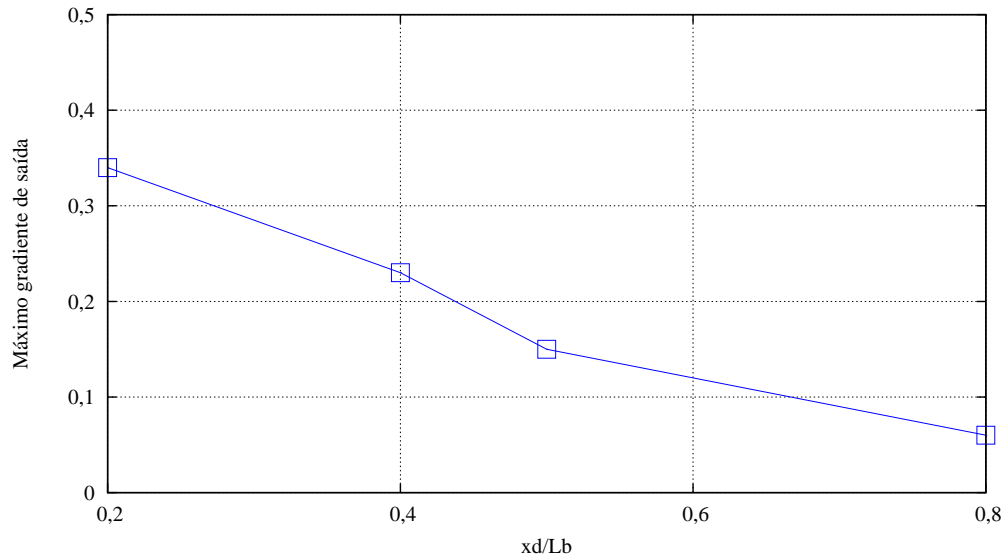


Figura 5.16: Valores do gradiente de saída com a variação da posição da cortina de drenagem

Verifica-se uma redução bastante expressiva do gradiente de saída, que está relacionado com a existência da cortina de drenagem, que produz efeitos bastante vantajosos quando se encontra a jusante.

5.5 Comparação com outro autor

Após a análise paramétrica realizada, procurou-se comparar os resultados obtidos com estudos semelhantes realizados por outros autores. Para o modelo em estudo apenas se realizou comparações relativamente à influência do comprimento.

Relativamente à influência do comprimento foram comparados resultados referentes à carga hidráulica (Mascarenhas, 1979).

Na tabela 5.5 são apresentadas as características dos modelos utilizados pelos diferentes autores para o estudo da influência do comprimento. As relações estudadas, embora diferentes, permitem efetuar as comparações apresentadas em seguida.

Tabela 5.5: Comparação da características do modelos de Mascarenhas (1979) e dos modelos utilizados

Autores	Mascarenhas (1979)	Presente dissertação
Relação de comprimento da cortina de impermeabilização	$L_c/L_b=0,375$	$L_c/L_b=0,5$
Relação de comprimento da cortina de drenagem	$L_d/L_b=0,25, 0,625$	$L_d/L_b=0,2, 0,4, 0,5, 0,8, 1,6$
Permeabilidade da cortina	$k_c = 10^{-7}$ $m \cdot s^{-1}$	$k_c = 10^{-8}$ $m \cdot s^{-1}$
Permeabilidade do solo	$k_s = 10^{-5}$ $m \cdot s^{-1}$	$k_s = 10^{-5}$ $m \cdot s^{-1}$
Geometria	$L_b=100$ m	$L_b=40$ m
	$H=80$ m	$H=40$ m
	$H_j=0$ m	$H_j=0$ m
Carga hidráulica na cortina de drenagem	$H_d=0$ m	$H_d=0$ m

Relativamente à carga hidráulica, apresenta-se na figura 5.17 o estudo comparativo com Mascarenhas (1979). Para facilitar a comparação, os valores do presente estudo, correspondentes à figura 5.3, foram convertidos em percentagem. Estes cálculos encontram-se nas tabelas A.32 a A.36 do anexo.

5.5 Comparação com outro autor

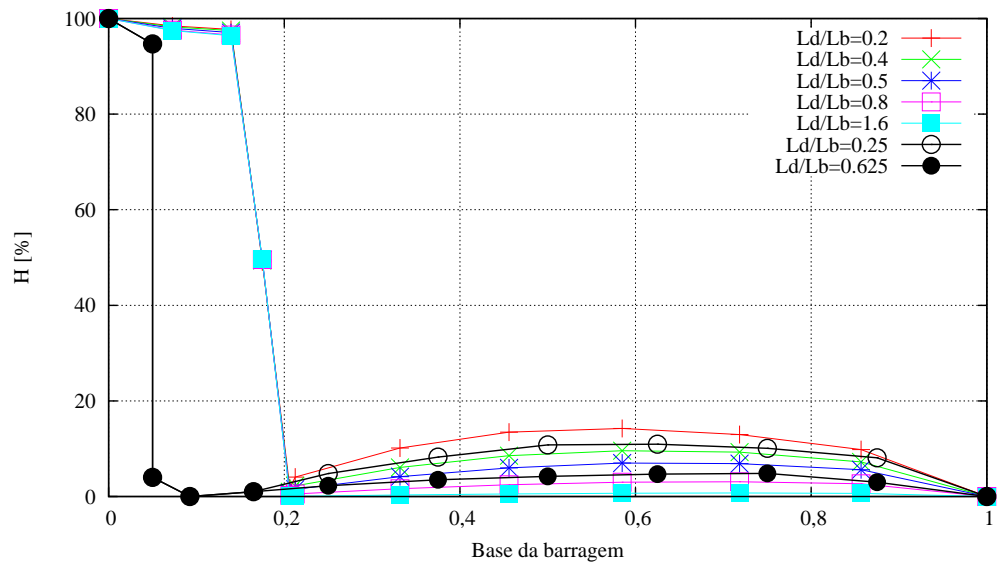


Figura 5.17: Comparação com os resultados obtidos por Mascarenhas (1979) relativamente à variação da carga hidráulica

Verificou-se uniformidade nos resultados obtidos. Apesar das diferenças evidenciadas, e da localização das cortinas não coincidirem nos dois estudos, observa-se que as curvas obtidas possuem o mesmo tipo de comportamento, ou seja, nos locais onde se situa a cortina de drenagem o valor da carga hidráulica é nulo, sofrendo uma ligeira subida ao longo da base da barragem e igualando o valor da carga a jusante.

Na figura 5.18 apresenta-se o estudo comparativo da resultante da carga hidráulica com Mascarenhas (1979). Os resultados do presente estudo correspondem à figura 5.3.

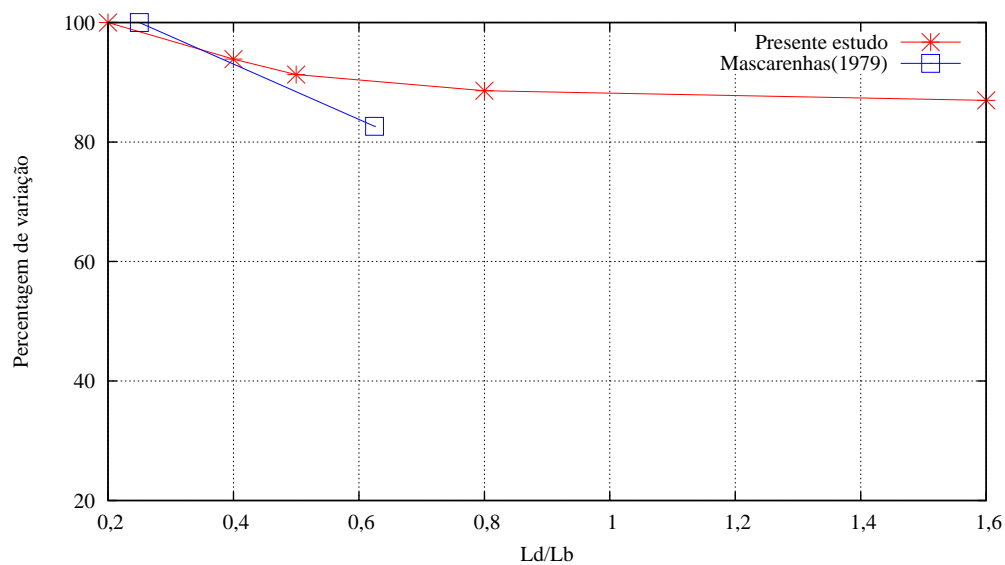


Figura 5.18: Comparação da resultante da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina de drenagem

Pode-se verificar uma diminuição nos dois casos apresentados. Verifica-se uma diminuição mais acentuada no modelo de Mascarenhas (1979) uma vez que as cortinas se localizam mais a montante.

Capítulo 6

Análise de resultados

6.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos no modelo com cortina de impermeabilização (capítulo 4) com os resultados obtidos no modelo com cortinas de impermeabilização e de drenagem (capítulo 5). Relativamente aos resultados obtidos para a cortina de impermeabilização, realizou-se mais um cálculo sem cortina, comparando os resultados obtidos no capítulo 4 com esta nova situação de base, de modo a avaliar o efeito da introdução de uma cortina. Relativamente aos resultados obtidos para a cortina de drenagem, os cálculos para uma situação sem esta cortina (mas com uma cortina de impermeabilização) encontram-se no capítulo 4, permitindo assim comparar os resultados obtidos no capítulo 5 com esta situação, de modo a avaliar o efeito acrescentado da introdução de uma cortina de drenagem, quando já existe uma cortina de impermeabilização. Esta análise foi realizada considerando as relações utilizadas para a resultante da carga hidráulica (RCH), e para o caudal, através do rácio de descarga (RD), com as adaptações necessárias para ser possível a sua comparação.

Relativamente ao modelo com cortina de impermeabilização do capítulo 4, as relações definidas em 3.3.2 foram alteradas de modo a verificar o efeito da introdução da cortina de impermeabilização relativamente ao modelo sem cortinas. Assim as equações 3.1 (PV) e 3.2 (RD), foram reescritas da seguinte forma :

$$PV(\%) = \frac{RCH_i}{RCH_{msc}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

onde,

- PV - percentagem de variação
- RCH - resultante da carga hidráulica
- i - corresponde a cada relação considerada
- msc - corresponde ao resultado do modelo sem cortinas

$$RD(\%) = \frac{Q_i}{Q_{msc}} \cdot 100 \quad (6.2)$$

onde,

- Q - caudal obtido na secção assinalada na figura 3.7
- i - corresponde a cada relação considerada
- msc - corresponde ao resultado do modelo sem cortinas

Relativamente ao modelo com cortinas de impermeabilização e de drenagem do capítulo 5, procurou-se verificar a efeito da introdução desta, relativamente a um modelo só com cortina de impermeabilização. Assim as relações definidas pela equações 3.1 e 3.2 sofrem as alterações necessárias para que seja possível comparar com um modelo sem a cortina de drenagem, mas com cortina de impermeabilização, com as características do capítulo 5 (20 metros de comprimento ($L_c/L_b = 0,5$), na vertical ($\theta = 90^\circ$), a 8 metros do paramento de montante ($x_c/L_b = 0,2$) e com um coeficiente de permeabilidade de $10^{-8} m \cdot s^{-1}$ ($k_c/k_s = 0,001$)). Um modelo com estas características já foi estudado no capítulo 4 e assim utilizou-se esses resultados para proceder à redefinição das equações 3.1 e 3.2 que ficam com a seguinte configuração:

$$PV(\%) = \frac{RCH_i}{RCH_{mscd}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

onde,

- PV - percentagem de variação
- RCH - resultante da carga hidráulica
- i - corresponde a cada relação considerada
- mscl - corresponde aos resultados do modelo sem cortina de drenagem

6.1 Introdução

$$RD(\%) = \frac{Q_i}{Q_{mscd}} \cdot 100 \quad (6.4)$$

onde,

- Q - caudal obtido na secção assinalada na figura 3.7
- i - corresponde a cada relação considerada
- $mscd$ - corresponde aos resultados do modelo sem cortina de drenagem

Refere-se que os valores do gradiente de saída foram comparados diretamente uma vez que não se definiu qualquer relação para esta grandeza.

Para se poder visualizar o estudo comparativo, alterou-se também as escalas do eixo das abcissas, uma vez que todas as análises realizadas foram relativas a parâmetros diferentes. Assim, ajustou-se a escala utilizada para as análises da inclinação, posição e permeabilidade à escala utilizada quando se verificou a influência do comprimento.

Na figura 6.1 apresenta-se a conversão do eixo das abcissas no estudo da influência da inclinação para a escala que se pretende adotar, correspondente ao estudo da influência do comprimento.

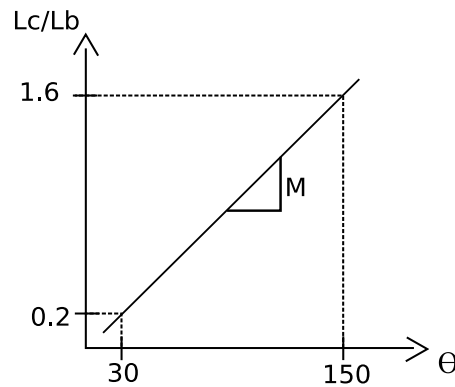


Figura 6.1: Representação da conversão dos eixos

Inicialmente, determinou-se o declive da reta através da equação 6.5.

$$M = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (6.5)$$

E determinou-se a ordenada da origem através da equação 6.6.

$$x^c = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + c \quad (6.6)$$

A título de exemplo, demonstra-se os cálculos efetuados para o caso em estudo e os valores finais obtidos na tabela 6.1.

$$0,2 = \frac{1,6 - 0,2}{150 - 30} \cdot 30 + c \rightarrow 0,2 = 0,01167 \cdot 30 + c \rightarrow c = -0,15$$

$$x^c = 0,01167 \cdot 60 - 0,15 \rightarrow x^c = 0,55$$

Tabela 6.1: Conversão de valores no eixo das abcissas

Valores no eixo inicial(x)	Valores no eixo convertido(x^c)
30	0,2
60	0,55
90	0,9
120	1,25
150	1,6

Após realizar esta conversão para todos os eixos das abcissas, obtiveram-se 4 eixos diferentes. Assim, nas figuras 6.2 6.3 e 6.4, existe um eixo ds abcissas que corresponde ao comprimento das cortinas (L_c/L_b e L_d/L_b ¹), outro que corresponde à inclinação (θ), outro à posição (x_c/L_b e x_d/L_b ²) e o inferior corresponde à permeabilidade (k_c/k_s) (só para o modelo com cortina de impermeabilização).

¹ Uma vez que a escala nestes eixos se manteve utilizou-se L_c/L_b para representação do eixo nos gráficos

² Uma vez que a escala nestes eixos se manteve utilizou-se x_c/L_b para representação do eixo nos gráficos

6.2 Efeito das cortinas de impermeabilização e de drenagem

Relativamente à resultante da carga hidráulica, apresenta-se os resultados das várias comparações na figura 6.2.

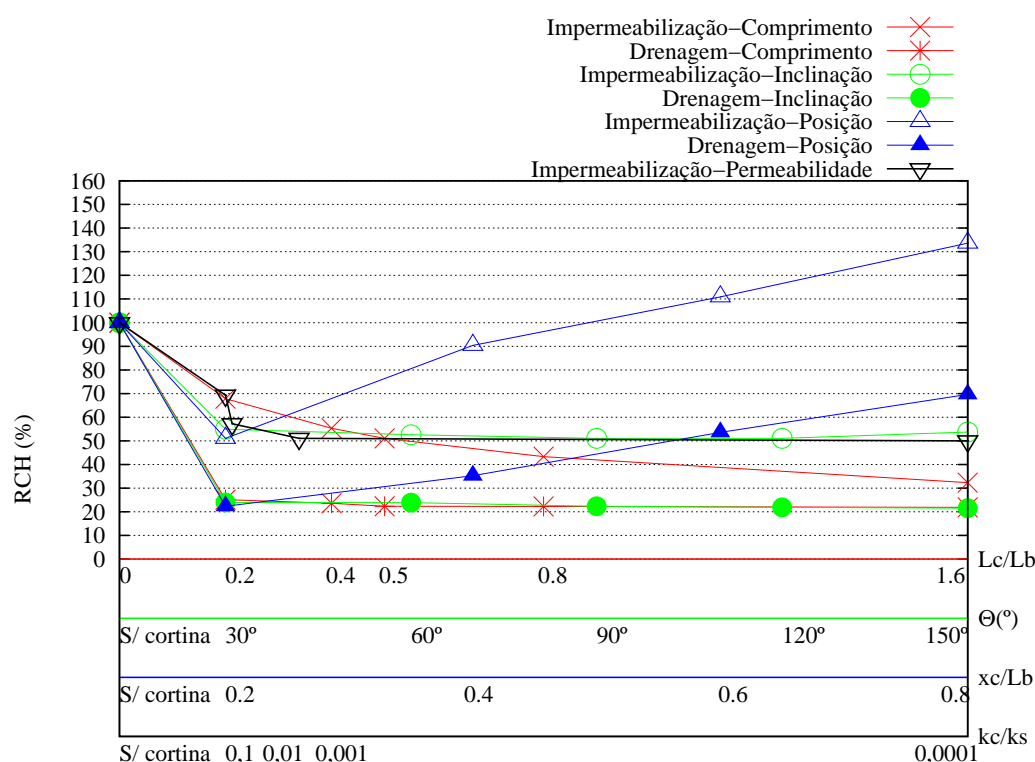


Figura 6.2: Comparação dos resultados obtidos em todas as análises relativamente à resultante da carga hidráulica

Na figura 6.2, é possível observar que a introdução da cortina de drenagem se traduz em reduções mais significativas da resultante da carga hidráulica em comparação com a introdução de uma cortina de impermeabilização. Verifica-se também que, em comparação com a utilização da cortina de drenagem, a influência da cortina de impermeabilização, na diminuição da resultante da carga hidráulica, tem um efeito mais reduzido, em praticamente todos os parâmetros.

Relativamente ao comprimento, observa-se que o modelo que utiliza apenas a cortina de impermeabilização depende bastante do seu comprimento para reduzir o valor da carga hidráulica. É possível observar reduções de cerca de 70% entre o comprimento máximo e o caso de não existir nenhum dispositivo de dissipação de energia. Quando se utiliza modelos com cortinas de impermeabilização e de drenagem, o fato de se incorporar esta

última, mesmo com o menor comprimento, reduz imediatamente cerca de 70%, ou seja, equivalente a introduzir uma cortina de impermeabilização com 64 metros ($L_c/L_b=1.6$) num modelo onde não existe qualquer tipo de dispositivo. Verifica-se que, apesar de existir uma redução da resultante da carga hidráulica, com o aumento do comprimento da cortina de drenagem (cerca de 10%), esta não é tão dependente do comprimento como o modelo que utiliza apenas a cortina de impermeabilização. Conclui-se portanto que, em termos de comprimento das cortinas, seria aceitável a utilização de uma cortina de impermeabilização e uma cortina de drenagem com comprimentos idênticos.

Relativamente à inclinação, verifica-se no primeiro modelo (apenas com cortina de impermeabilização) que a linha obtida é praticamente horizontal, ou seja, independentemente da inclinação desta, a resultante da carga hidráulica manteve-se sensivelmente igual. Quanto ao modelo que utiliza cortina de impermeabilização e cortina de drenagem, pode-se concluir que a inclinação também não tem influência uma vez que a linha também é horizontal, mas a introdução da cortina de drenagem, diminuiu em cerca de 80% o valor da resultante enquanto que no primeiro caso as reduções são de cerca de 45%.

Relativamente à localização, verifica-se que o fato de se deslocar as cortinas, seja a de impermeabilização ou a de drenagem, para jusante provocou um aumento da resultante da carga hidráulica. No modelo com cortina de impermeabilização verifica-se um aumento bastante acentuado desta grandeza, apesar da redução inicial, devido à introdução da cortina de impermeabilização. Pode-se então afirmar que a cortina de impermeabilização deve situar-se o mais próximo possível do paramento de montante, de modo a obter resultados mais vantajosos. Quanto ao modelo com cortinas de impermeabilização e drenagem, verifica-se que a introdução desta última no maciço de fundação diminuiu em mais do dobro o resultado obtido apenas com a cortina de impermeabilização. Com o deslocar desta para jusante também existe um aumento, mas neste caso muito menos expressivo. Verificou-se no entanto que o desenvolvimento das curvas obtidas é semelhante e tende para um aumento conforme as cortinas se desloquem para jusante. Conclui-se portanto que, tanto a cortina de impermeabilização como a de drenagem devem situar-se o mais perto possível do paramento de montante.

Relativamente à permeabilidade, os resultados obtidos mostram que as variações mais acentuadas acontecem até $k_c/k_s = 0,001$. A partir desta relação, o gráfico obtido traduz-se numa linha horizontal, ou seja, não existe variações que justifiquem a alteração. Conclui-se que a melhor relação de permeabilidade a utilizar, para o caso em estudo, é de $k_c/k_s = 0,001$.

Relativamente ao rácio de descarga, apresenta-se os resultados das várias comparações na figura 6.3.

6.2 Efeito das cortinas de impermeabilização e de drenagem

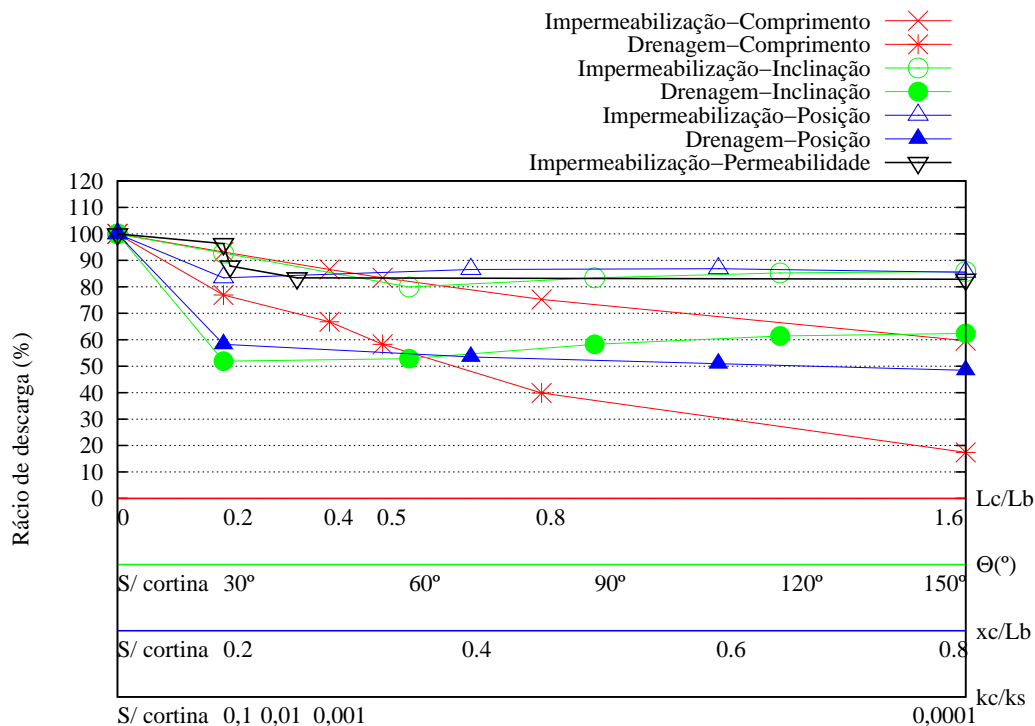


Figura 6.3: Comparação dos resultados obtidos em todas as análises relativamente ao rácio de descarga

Relativamente ao rácio de descarga, pode-se observar que o parâmetro que mais influencia esta grandeza é o comprimento e que, de acordo com os resultados iniciais, a introdução da cortina de impermeabilização é menos expressivo do quando se introduz a cortina de drenagem. Verifica-se que, para o mesmo comprimento, a introdução de uma cortina de drenagem provoca reduções de cerca de 20% e a introdução de uma cortina de impermeabilização reduções de cerca de 10%. No entanto, com o aumento da cortina de drenagem esta redução chega a atingir valores de cerca de 80% e com o aumento da cortina de impermeabilização apenas 40%. Neste caso, tanto o modelo com cortina de drenagem como o modelo com cortina de impermeabilização ficam dependente do comprimento para produzir resultados expressivos. Verifica-se também que, tanto a inclinação como a posição não contribuem para a diminuição do rácio de descarga. A partir da introdução destes dispositivos nos modelos, não se verifica a tendência de diminuição nas linhas obtidas que se obteve no estudo do comprimento, registando-se um ligeiro aumento quando a cortina se inclina ou desloca para jusante. Quanto à permeabilidade da cortina de impermeabilização, verifica-se uma ligeira diminuição quando esta diminui a sua permeabilidade. No entanto, os resultados não são acentuados.

Conclui-se através dos resultados obtidos relativamente à carga hidráulica, por meio da resultante da carga hidráulica, e ao caudal, por meio do rácio de descarga que a cortina de drenagem tem um efeito muito mais expressivo na carga hidráulica do que a cortina de impermeabilização. Verifica-se que a utilização da cortina de drenagem produz resultados mais notáveis que só são obtidos com comprimento elevado para a cortina de impermeabilização. Quanto ao caudal verificou-se que tanto a cortina de impermeabilização como a de drenagem produzem resultados sensivelmente iguais após a sua introdução nos modelos. Apenas com comprimentos elevados da cortina de drenagem, atinge-se resultados bastante positivos na diminuição desta grandeza.

Relativamente ao gradiente de saída, apresenta-se os resultados das várias comparações na figura 6.4.

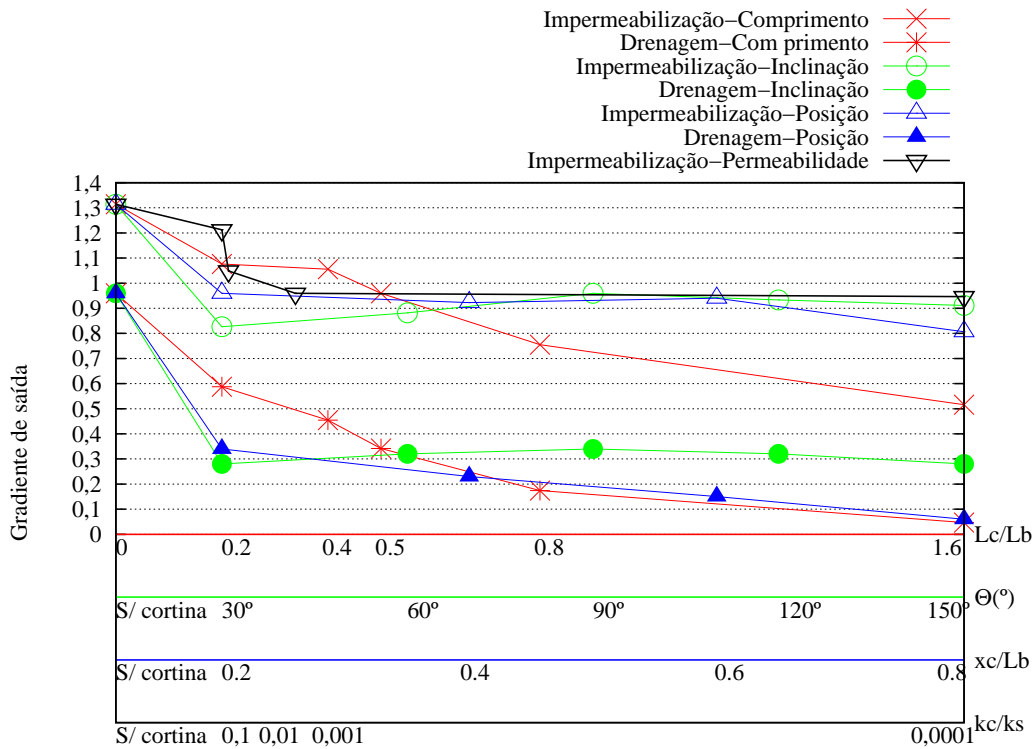


Figura 6.4: Comparação dos resultados obtidos em todas as análises relativamente ao máximo gradiente de saída

Relativamente ao gradiente de saída observa-se, pelos valores iniciais, que a utilização da cortina de drenagem diminui o seu valor. Nas análises da inclinação e da posição, esta diminuição é superior a 50%. Um dos resultados mais interessantes de observar está relacionado com o aumento do comprimento da cortina e a sua localização a jusante. Como se pode observar no gráfico, o ponto correspondente a uma cortina com 64 metros

6.2 Efeito das cortinas de impermeabilização e de drenagem

de comprimento ($L_d/L_b=1,6$) é coincidente com o ponto de uma cortina localizada a 32 metros do paramento de montante ($x_d/L_b=0,8$). No entanto, tal não se verifica sem a utilização da cortina de drenagem. Verifica-se também que a alteração da inclinação volta a não produzir resultados expressivos e que uma relação de permeabilidade superior a $k_c/k_s = 0.0001$ não se justifica.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusões

Nesta dissertação começou-se por identificar a problemática do escoamento nos maciços de fundação de barragens de betão, tendo como principal objetivo a determinação das ações daí decorrentes. De entre as ações identificadas, a que assume um papel preponderante para a estabilidade da estrutura, é a ação das subpressões. Para tal, é necessário a utilização de elementos de dissipação de energia, sendo utilizados nas obras hidráulicas, ou seja, as cortinas de impermeabilização e de drenagem, que com métodos de funcionamento diferentes, contribuem para minimizar a ação das subpressões, controlar o fluxo na fundação e, conseqüentemente, o gradiente de saída.

Os resultados proporcionados pelo programa de cálculo automático foram verificados através das soluções analíticas de Ijam (2011) e de Andrade (1982). Como se viu, a primeira permitia a obtenção do desenvolvimento da carga hidráulica ao longo da base da barragem, onde se encontra uma cortina de impermeabilização, e os resultados obtidos no SEEP/W[®] estavam em conformidade com os da solução analítica. A segunda solução permitia a determinação dos caudais de montante, de jusante e do que flui para a cortina de drenagem, através da determinação prévia da carga hidráulica na zona onde a cortina se situa. Na comparação de resultados (analítico e numérico), verificou-se que o método numérico está de acordo com as soluções analíticas e que portanto reproduz de forma adequada os problemas que se pretendeu estudar.

No estudo paramétrico realizado, referente à cortina de impermeabilização, pretendeu-se verificar a influência da sua introdução no maciço de fundação e obter a melhor situação para os casos estudados. Para tal, foram realizadas alterações no comprimento, na inclina-

ção, na posição e na permeabilidade do material que constitui a cortina. Verificou-se que embora a sua introdução contribua para a diminuição das grandezas que foram estudadas (carga hidráulica, caudal e gradiente de saída), só se atinge melhores resultados, relativos a estas grandezas, com cortinas de comprimento bastante elevado, ou seja, quanto maior o comprimento, maior é a redução que esta consegue originar. No entanto, obtém-se reduções mais evidentes na resultante da carga hidráulica e no gradiente de saída (cerca de 50%) do que no rácio de descarga (cerca de 35%). Constatou-se que a implementação da cortina com inclinações diferentes não trouxe variações relevantes aos resultados relativos à carga hidráulica, caudal e gradiente de saída. Neste caso, para todas as grandezas analisadas, as variações determinadas foram inferiores a 15% e portanto a sua configuração no maciço deve estar relacionada com as suas condicionantes geológicas. Qualquer posição da cortina que tenda a afastar-se do paramento de montante da barragem não contribuiu para a diminuição da resultante da carga hidráulica, tendo provocado um aumento bastante significativo (cerca de 150%). Relativamente ao rácio de descarga e ao máximo gradiente de saída, as variações foram pouco significativas (inferiores a 15%). Através dos resultados obtidos, verificou-se também que a permeabilidade do material da cortina de impermeabilização deve situar-se na ordem da milésima da permeabilidade do maciço de fundação onde se consegue atingir reduções da ordem dos 25% para a resultante da carga hidráulica e máximo gradiente de saída e de 15% no rácio de descarga. A partir desta relação, o comportamento das curvas obtidas em todas as grandezas não sofre variações significativas.

No estudo paramétrico realizado com o intuito de analisar a importância da utilização da cortina de drenagem, em conjunto com a cortina de impermeabilização promoveu-se a alteração do comprimento, inclinação e posição da cortina de drenagem de modo a determinar a melhor situação. Verificou-se que a utilização da cortina de drenagem promove, desde início, uma redução significativa dos valores obtidos quando comparado apenas com a existência da cortina de impermeabilização. Concluiu-se que a cortina de drenagem não está dependente do comprimento para produzir resultados expressivos na resultante da carga hidráulica, tendo com o aumento do comprimento, provocado uma redução muito superior no rácio de descarga (cerca de 75%) e no gradiente de saída (cerca de 60%) do que na resultante da carga hidráulica, onde a variação foi inferior a 20%. Verificou-se também duas das conclusões obtidas anteriormente. A primeira referente à inclinação da cortina de drenagem, que tal como a de impermeabilização, deve estar relacionada com as condicionantes geológicas do maciço, ou seja, deve ter a inclinação que intersete o maior número de falhas do maciço. Tal como anteriormente, as variações observáveis (inferiores a 20%) foram bastante inferiores quando comparadas com o estudos de outros parâmetros. A segunda, referente à posição desta, deve situar-se a o mais próximo possível de montante, uma vez que o posicionamento da cortina mais para jusante provoca

7.1 Conclusões

um aumento muito expressivo da resultante da carga hidráulica, superior a 50% do valor inicial. Devido ao seu mecanismos de funcionamento, a cortina de drenagem deve situar-se imediatamente a jusante da cortina de impermeabilização e devem os dois dispositivos, situar-se o mais próximo possível de montante. Verificou-se também que a utilização conjunta das cortinas de impermeabilização e de drenagem constitui a melhor solução na redução da carga hidráulica, caudal e gradiente de saída. A análise realizada contribui assim para reafirmar que estas duas soluções devem ser utilizadas de forma associada, e não separadamente, uma vez que são dependentes para terem um desempenho eficaz.

Com o objetivo de verificar se os resultados obtidos apresentam conformidade com estudos realizados anteriormente por outros autores, comparou-se os resultados obtidos por esses autores com os obtidos neste trabalho. Assim, tendo em conta as características geométricas e o tipo de materiais utilizadas nos modelos desses autores, comparou-se essencialmente o desenvolvimento dos resultados obtidos.

Na comparação do comprimento da cortina de impermeabilização verificou-se, quer no presente estudo, quer nos estudos de Moharrami et al. (2014) e de Mascarenhas (1979), a mesma tendência de diminuição da carga hidráulica e do máximo gradiente de saída, com o aumento do comprimento das cortinas. Quanto à cortina de drenagem, a comparação realizada apenas com Mascarenhas (1979) permitiu verificar que o desenvolvimento das curvas obtidas nos dois estudos é bastante semelhante.

Na comparação da inclinação cortina de impermeabilização verificou-se que, quer no presente estudo quer nos estudos de Moharrami et al. (2014) e de Al-saadi et al. (2011), tanto na resultante da carga hidráulica quer no máximo gradiente de saída, as curvas obtidas nos três estudos apresentam desenvolvimentos bastante semelhantes donde se pode concluir que as variações existentes nos três estudos são pouco expressivas (inferiores a 10%).

Na comparação da localização da cortina de impermeabilização verificou-se que, quer no presente estudo, quer no estudo de Mansuri et al., 2014, se obteve resultados bastante idênticos. Quanto à resultante da carga hidráulica, verificou-se a mesma tendência de aumento nos dois estudo quando a cortina se desloca para jusante. Quanto ao rácio de descarga, o desenvolvimento das curvas obtidas é bastante semelhante nos dois casos e pode-se também afirmar que o valor do máximo do gradiente de saída diminui quando a cortina se aproxima de jusante.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

As análises realizadas concentraram-se em modelos onde o solo de fundação foi considerado homogêneo e isotrópico. Uma proposta seria considerar a utilização de um maciço estratificado e um solo anisotrópico em relação à permeabilidade.

A barragem utilizada teve sempre as mesmas características geométricas (40 metros de comprimento da base e suficientemente alta para acondicionar uma albufeira com 40 metros de altura). Propõem-se uma análise onde se considere barragens de menor altura (segundo o Regulamento de segurança de barragens seriam inferiores a 15 metros) e barragens com alturas maiores, recomendado cerca de 80 a 100 metros. Desta forma verificar-se-á se o efeito estudado das cortinas de impermeabilização e de drenagem está dependente da altura de água a montante.

Propõem-se ainda a utilização de mais que uma cortina de impermeabilização ou de drenagem. Deste modo é possível obter um conjunto de situações muito mais vasto do que foi apresentado neste estudo e verificar a sua influência. Recomenda-se que neste caso seja também realizado uma análise custo/benefício, uma vez que a introdução de mais uma solução construtiva acarreta custos que devem ser alvo deste tipo de análise.

Bibliografia

- Al-saadi, S. I. K., H. T. N. Al-damarchi e H. C. D. Al-zrejawi (2011). “Optimum Location and Angle of Inclination of Cut-off to Control Exit Gradient and Uplift Pressure Head under Hydraulic Structures”. Em: *Jordan Journal Of Civil Engineering* 5.3, pp. 380–391.
- Andrade, R. M. (1982). *A drenagem nas fundações de estruturas hidraulicas*, pp. 141–190.
- B.I.S. (1993). *Guidelines for the Design of Grout, Part 2: Mansory and Concrete Gravity Dams*. New Delhi, pp. 1–8.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. Vol. 20. 3, pp. 657–722.
- Das, B. M. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. 3rd Edition. Vol. 66. 42. Taylor & Francis Group, pp. 210–262.
- Ewert, F. (2003). “Discussion of Rock Type Related Criteria for Curtain Grountin”. Em: *Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Improvement*. Reston, VA: ASCE Special Publication N° 120.
- Farinha, M. L. M. d. V. B. (2009). “Hydromechanical behaviour of concrete dam foundation. In situ tests and numercial modelling”. Tese de doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa- Instituto Superior Técnico, pp. 110–151.
- Fell, R., P. MacGregor, D. Stapledon e G. Bell (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Vol. 53. Taylor & Francis Group, pp. 728–767.
- Gama, P. S. d. S. (2012). “Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens : Revisão crítica de metodologias”. Tese de doutoramento. Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de Ciências e Tecnologias.
- Geostudio (2007). *Seepage Modeling with SEEP / W*.
- Ijam, A. Z. (2011). “Dams with an Inclined Cutoff”. Em: *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 16.4, pp. 1427–1440.
- Mansuri, B., F. Salmasi e B. Oghati (2014). “Effect of Location and Angle of Cutoff Wall on Uplift Pressure in Diversion Dam”. Em: *Geotechnical and Geological Engineering* 32.5, pp. 1165–1173.

- Mascarenhas, A. A. d. F. T. (1979). *Percolação na Fundação de Barragens de Betão*. Tese para obtenção do grau de especialista. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 121–258.
- Mikkelsen, P. (2002). “Cement-Bentonite Grout Backfill of Borehole Instruments”. Em: *Geotechnical Instrumentation News*, pp. 38–42.
- Moharrami, A., G. Moradi, M. H. Bonab, J. Katebi e G. Moharrami (2014). “Performance of Cutoff Walls Under Hydraulic Structures Against Uplift Pressure and Piping Phenomenon”. Em: *Geotechnical and Geological Engineering* 33.1, pp. 95–103.
- Murthy, V. (2003). *Geotechnical Engineering-Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. XXXIII, pp. 87–983.
- Pereira, R. M. R. (2011). “Análise probabilística da segurança ao deslizamento de barragens gravidade de betão”. Tese de mestrado. Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de Ciências e Tecnologias, pp. 1–4.
- RIDAS (2007). *Gruvindustrins riktlinjer för dammsäkerhet*.
- RSB (2007). *Regulamento de Segurança de Barragens e correspondentes portarias: I - Normas de projetos de barragens*. Decreto-Lei 344/2007 de 15 de Outubro, Diário da República, Lisboa.
- Ruggeri, G. (2004). “Uplift Pressures under Concrete Dams”.
- Santana, M. T. T. G. (2015). *Apontamentos da disciplina de obras de Terra: Percolação, FCT/UNL, Lisboa*.
- U.S.B.R. (2012). *Embankment Dams. Chapter 2: Embankment Design*. Rel. téc.

Apêndice A

Anexo

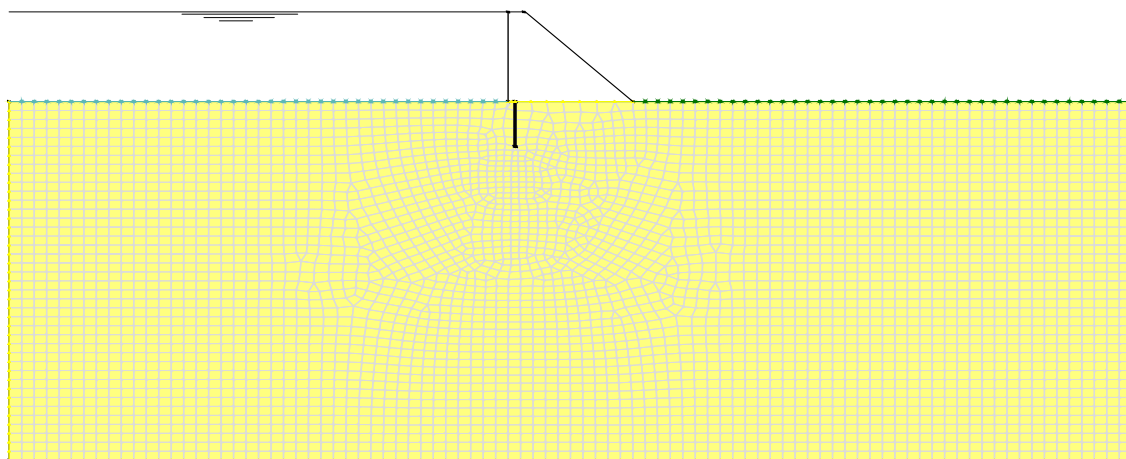


Figura A.1: Malha de elementos finitos gerada para a discretização mais reduzida

Tabela A.1: Resultante da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização

L_c/L_b	Valor da resultante da carga hidráulica (m)	% de variação
0,2	542,71	100,00%
0,4	442,43	81,52%
0,5	408,27	75,23%
0,8	338,63	62,40%
1,6	258,50	47,63%

Tabela A.2: Gradiente de saída com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização

L_c/L_b	Gradiente de saída
0,2	1,08
0,4	1,06
0,5	0,96
0,8	0,76
1,6	0,52

Tabela A.3: Resultante da carga hidráulica com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização

Ângulos (°)	Valor da resultante da carga hidráulica (m)	% de variação
30	439,28	100,00%
60	420,74	95,78%
90	408,27	92,94%
120	408,66	93,03%
150	429,21	97,71%

Tabela A.4: Gradiente de saída com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização

Ângulos(°)	Gradiente de saída
30	0,83
60	0,88
90	0,96
120	0,93
150	0,91

Tabela A.5: Resultante da carga hidráulica com a variação da posição da cortina de impermeabilização

x_c/L_b	Valor da RCH obtido (m)	% de variação
0,2	408,27	100,00%
0,4	723,06	177,10%
0,6	887,13	217,29%
0,8	1059,11	259,41%

Tabela A.6: Gradiente de saída com a variação da posição da cortina de impermeabilização

x_c/L_b	Gradiente de saída
0,2	0,96
0,4	0,92
0,6	0,94
0,8	0,81

Tabela A.7: Resultante da carga hidráulica com a variação da permeabilidade da cortina de impermeabilização

k_c/k_s	Valor da resultante da carga hidráulica(m)	% de variação
0,1	554,63	100,00%
0,01	458,07	82,59%
0,001	408,27	73,61%
0,0001	401,00	72,30%

Tabela A.8: Gradiente de saída com a variação da permeabilidade da cortina de impermeabilização

k_c/k_s	Gradiente de saída
0,1	1,21
0,01	1,05
0,001	0,96
0,0001	0,95

Tabela A.9: Variação da carga hidráulica para um comprimento da cortina de impermeabilização de $\frac{L_c}{L_b} = 0,2$

Lc/Lb=0,2			
Distância(m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica(%)
0,00	0,00	40,00	100,00%
4,09	0,10	39,28	98,20%
8,00	0,20	38,94	97,36%
8,25	0,21	31,89	79,73%
8,50	0,21	23,90	59,74%
13,37	0,33	22,96	57,41%
18,40	0,46	21,08	52,70%
24,60	0,61	18,60	46,50%
28,95	0,72	15,79	39,47%
32,47	0,81	12,54	31,36%
36,56	0,91	8,69	21,71%
40,00	1,00	0,00	0,00%

Tabela A.10: Variação da carga hidráulica para um comprimento da cortina de impermeabilização de $\frac{L_c}{L_b} = 0,4$

Lc/Lb=0,4			
Distância(m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica(%)
0,00	0,00	40,00	100,00%
4,09	0,10	39,52	98,80%
8,00	0,20	39,28	98,21%
8,25	0,21	29,26	73,16%
8,50	0,21	18,60	46,49%
13,37	0,33	18,10	45,26%
18,40	0,46	17,02	42,54%
24,60	0,61	15,45	38,63%
28,95	0,72	13,39	33,47%
32,47	0,81	10,87	27,16%
36,56	0,91	7,43	18,58%
40,00	1,00	0,00	0,00%

Tabela A.11: Variação da carga hidráulica para um comprimento da cortina de impermeabilização de $\frac{L_c}{L_b} = 0,5$

Lc/Lb=0,5			
Distância(m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica(%)
0,00	0,00	40,00	100,00%
4,09	0,10	39,53	98,84%
8,00	0,20	39,33	98,33%
8,25	0,21	28,34	70,84%
8,50	0,21	16,80	41,99%
13,37	0,33	16,36	40,91%
18,40	0,46	15,46	38,65%
24,60	0,61	14,14	35,35%
28,95	0,72	12,36	30,90%
32,47	0,81	10,06	25,16%
36,56	0,91	7,02	17,56%
40,00	1,00	0,00	0,00%

Tabela A.12: Variação da carga hidráulica para um comprimento da cortina de impermeabilização de $\frac{L_c}{L_b} = 0,8$

Lc/Lb=0,8			
Distância(m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica(%)
0,00	0,00	40,00	100,00%
4,09	0,10	39,63	99,08%
8,00	0,20	39,45	98,63%
8,25	0,21	26,49	66,21%
8,50	0,21	13,12	32,80%
13,37	0,33	12,75	31,87%
18,40	0,46	12,11	30,27%
24,60	0,61	11,16	27,89%
28,95	0,72	9,88	24,69%
32,47	0,81	8,14	20,36%
36,56	0,91	5,74	14,34%
40,00	1,00	0,00	0,00%

Tabela A.13: Variação da carga hidráulica para um comprimento da cortina de impermeabilização de $\frac{L_c}{L_b} = 1,6$

Lc/Lb=1,6			
Distância(m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica(%)
0,00	0,00	40,00	100,00%
4,09	0,10	39,72	99,30%
8,00	0,20	39,56	98,91%
8,25	0,21	24,09	60,24%
8,50	0,21	8,90	22,24%
13,37	0,33	8,55	21,37%
18,40	0,46	8,07	20,18%
24,60	0,61	7,43	18,58%
28,95	0,72	6,59	16,48%
32,47	0,81	5,45	13,63%
36,56	0,91	3,93	9,82%
40,00	1,00	0,00	0,00%

Tabela A.14: Resultados obtidos por Moharrami et al. (2014) relativamente á resultante das subpressões com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização

L_c/L_b	Valor da resultante das subpressões(kPa)	% de variação
0,1	10950	100,00%
0,2	10100	92,24%
0,3	9300	84,93%
0,4	8000	73,06%

Tabela A.15: Resultados obtidos por Moharrami et al. (2014) relativamente ao gradiente de saída com a variação do comprimento da cortina de impermeabilização

L_c/L_b	Gradiente de saída
0,1	0,50
0,2	0,45
0,3	0,41
0,4	0,34

Tabela A.16: Variação da carga hidráulica para a inclinação da cortina de $\theta = 30^\circ$

$\theta = 30^\circ$			
Distância (m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
4,09	0,10	39,90	99,74
8,00	0,20	39,88	99,70
8,25	0,21	27,85	69,63
8,50	0,21	17,36	43,41
13,37	0,33	16,46	41,15
18,40	0,46	15,15	37,87
24,60	0,61	13,56	33,90
28,95	0,72	11,69	29,22
32,47	0,81	9,41	23,52
36,56	0,91	6,57	16,44
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.17: Variação da carga hidráulica para a inclinação da cortina de $\theta = 60^\circ$

$\theta = 60^\circ$			
Distância (m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
4,09	0,10	39,85	99,63
8,00	0,20	39,84	99,60
8,25	0,21	28,05	70,11
8,50	0,21	17,43	43,57
13,37	0,33	16,70	41,75
18,40	0,46	15,50	38,74
24,60	0,61	13,96	34,89
28,95	0,72	12,06	30,15
32,47	0,81	9,76	24,39
36,56	0,91	6,80	17,01
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.18: Variação da carga hidráulica para a inclinação da cortina de $\theta = 90^\circ$

$\theta = 90^\circ$			
Distância (m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
4,09	0,10	39,53	98,84
8,00	0,20	39,33	98,33
8,25	0,21	28,34	70,84
8,50	0,21	16,80	41,99
13,37	0,33	16,36	40,91
18,40	0,46	15,46	38,65
24,60	0,61	14,14	35,35
28,95	0,72	12,36	30,90
32,47	0,81	10,06	25,16
36,56	0,91	7,02	17,56
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.19: Variação da carga hidráulica para a inclinação da cortina de $\theta = 120^\circ$

$\theta = 120^\circ$			
Distância (m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
4,09	0,10	39,53	98,84
8,00	0,20	39,33	98,33
8,25	0,21	28,27	70,84
8,50	0,21	17,80	44,49
13,37	0,33	16,36	40,91
18,40	0,46	15,46	38,65
24,60	0,61	14,14	35,35
28,95	0,72	12,36	30,90
32,47	0,81	10,06	25,16
36,56	0,91	7,02	17,56
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.20: Variação da carga hidráulica para a inclinação da cortina de $\theta = 150^\circ$

$\theta = 150^\circ$			
Distância (m)	Distância relativa	Carga hidráulica(m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
4,09	0,10	39,53	98,84
8,00	0,20	39,33	98,33
8,25	0,21	28,25	70,84
8,50	0,21	17,90	44,74
13,37	0,33	16,56	41,41
18,40	0,46	15,46	38,65
24,60	0,61	14,14	35,35
28,95	0,72	12,36	30,90
32,47	0,81	10,16	25,41
36,56	0,91	7,08	17,71
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.21: Resultados obtidos por Moharrami et al. (2014) relativamente á resultante das subpressões com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização

Ângulos ($^\circ$)	Valor da resultante das subpressões(kPa)	% de variação
20	10600	100,00%
40	10400	98,11%
60	10300	97,17%
90	10100	95,28%
120	10550	99,53%
140	10800	101,89%
160	11200	105,66%

Tabela A.22: Resultados obtidos por Moharrami et al. (2014) relativamente ao gradiente de saída com a variação da inclinação da cortina de impermeabilização

Ângulos ($^\circ$)	Gradiente de saída
20	0,43
40	0,45
60	0,45
90	0,45
120	0,46
140	0,48
160	0,51

Tabela A.23: Resultados obtidos por Mansuri et al. (2014) relativamente à resultante da carga hidráulica com a variação da posição da cortina de impermeabilização

x_c/L_b	Valor da RCH obtido (m)	% de variação
0,2	268,76	100,00%
0,4	344,55	128,20%
0,6	578,96	215,42%
0,8	759,24	282,50%

Tabela A.24: Resultados obtidos por Mansuri et al. (2014) relativamente ao caudal com a variação da posição da cortina de impermeabilização

x_c/L_b	Caudal $*10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	% de variação
0,2	3,34	100,00%
0,4	3,78	113,15%
0,6	3,74	111,86%
0,8	3,44	102,91%

Tabela A.25: Resultados obtidos por Mansuri et al. (2014) relativamente ao gradiente de saída com a variação da posição da cortina de impermeabilização

x_c/L_b	Gradiente de saída
0,2	0,53
0,4	0,51
0,6	0,42
0,8	0,33

Tabela A.26: Resultante da carga hidráulica com a variação do comprimento da cortina de drenagem

L_c/L_b	Valor da resultante da carga hidráulica (m)	% de variação
0,2	102,67	100,00%
0,4	96,29	93,78%
0,5	93,64	91,20%
0,8	90,86	88,50%
1,6	89,20	86,96%

Tabela A.27: Gradiente de saída com a variação do comprimento da cortina de drenagem

L_c/L_b	Gradiente de saída
0,2	0,59
0,4	0,43
0,5	0,34
0,8	0,18
1,6	0,05

Tabela A.28: Resultante da carga hidráulica com a variação da inclinação da cortina de drenagem

Ângulos (°)	Valor da resultante da carga hidráulica (m)	% de variação
30	97,67	100,00%
60	97,42	99,77%
90	93,64	96,11%
120	89,38	91,52%
150	88,08	90,20%

Tabela A.29: Gradiente de saída com a variação da inclinação da cortina de drenagem

Ângulos(°)	Gradiente de saída
30	0,28
60	0,32
90	0,34
120	0,32
150	0,28

Tabela A.30: Resultante da carga hidráulica com a variação da posição da cortina de drenagem

x_c/L_b	Valor da RCH obtido (m)	% de variação
0,2	329,30	100,00%
0,4	353,27	107,27%
0,6	477,54	145,01%
0,8	544,73	165,42%

Tabela A.31: Gradiente de saída com a variação da posição da cortina de drenagem

x_c/L_b	Gradiente de saída
0,2	0,34
0,4	0,25
0,6	0,16
0,8	0,08

Tabela A.32: Variação da carga hidráulica ao longo da base da barragem para um comprimento da cortina de drenagem de $\frac{L_d}{L_b} = 0,2$

Ld/Lb=0,2			
Distância (m)	Distância Relativa	Carga hidráulica (m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
2,91	0,07	39,38	98,45
5,58	0,14	39,09	97,73
8,00	0,20	19,64	49,10
8,25	0,21	0,72	1,80
8,50	0,21	1,62	4,06
13,27	0,33	4,06	10,16
18,24	0,46	5,39	13,48
23,39	0,58	5,69	14,23
28,74	0,72	5,18	12,96
34,27	0,86	3,92	9,81
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.33: Variação da carga hidráulica na base da barragem para um comprimento da cortina de drenagem de $\frac{L_d}{L_b} = 0,4$

Ld/Lb=0,4			
Distância (m)	Distância Relativa	Carga hidráulica (m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
2,91	0,07	39,30	98,26
5,58	0,14	38,99	97,47
8,00	0,20	19,75	49,38
8,25	0,21	0,40	0,99
8,50	0,21	0,89	2,23
13,27	0,33	2,43	6,08
18,24	0,46	3,41	8,54
23,39	0,58	3,83	9,57
28,74	0,72	3,71	9,28
34,27	0,86	2,90	7,25
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.34: Variação da carga hidráulica na base da barragem para um comprimento da cortina de drenagem de $\frac{L_c}{L_b} = 0,5$

Ld/Lb=0,5			
Distância (m)	Distância Relativa	Carga hidráulica (m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
2,91	0,07	39,18	97,95
5,58	0,14	38,82	97,06
8,00	0,20	19,79	49,47
8,25	0,21	0,27	0,67
8,50	0,21	0,61	1,51
13,27	0,33	1,66	4,15
18,24	0,46	2,39	5,98
23,39	0,58	2,80	7,00
28,74	0,72	2,75	6,88
34,27	0,86	2,24	5,60
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.35: Variação da carga hidráulica na base da barragem para um comprimento da cortina de drenagem de $\frac{L_d}{L_b} = 0,8$

Ld/Lb=0,8			
Distância (m)	Distância Relativa	Carga hidráulica (m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
2,91	0,07	39,03	97,58
5,58	0,14	38,62	96,56
8,00	0,20	19,83	49,58
8,25	0,21	0,09	0,23
8,50	0,21	0,21	0,52
13,27	0,33	0,65	1,62
18,24	0,46	0,98	2,45
23,39	0,58	1,20	2,99
28,74	0,72	1,24	3,09
34,27	0,86	1,06	2,66
40,00	1,00	0,00	0,00

Tabela A.36: Variação da carga hidráulica na base da barragem para um comprimento da cortina de drenagem de $\frac{L_d}{L_b} = 1,6$

Ld/Lb=1,6			
Distância (m)	Distância Relativa	Carga hidráulica (m)	Carga hidráulica (%)
0,00	0,00	40,00	100,00
2,91	0,07	38,99	97,47
5,58	0,14	38,56	96,40
8,00	0,20	19,86	49,64
8,25	0,21	0,01	0,02
8,50	0,21	0,02	0,04
13,27	0,33	0,13	0,33
18,24	0,46	0,21	0,54
23,39	0,58	0,27	0,68
28,74	0,72	0,29	0,74
34,27	0,86	0,27	0,66
40,00	1,00	0,00	0,00